



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**Eksperimen dan Simulasi Finite Element Method
(FEM) Pengaruh Topologi Pemotongan Inti
Transformator Tiga Fasa Pada Kurva Magnetisasi
dan Arus Inrush**

Rahman Cahyadiputra
NRP 2211100210

Dosen Pembimbing
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Daniar Fahmi, ST., MT.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

***FINITE ELEMENT METHOD SIMULATION AND
EXPERIMENTAL OF CORE CUTTING TOPOLOGY OF
THREE PHASE TRANSFORMER EFFECT ON
MAGNETIZATION CURVE AND INRUSH CURRENT***

Rahman Cahyadiputra
NRP 2211100210

Advisor
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Danar Fahmi, ST., MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015

**EKSPERIMEN DAN SIMULASI FINITE ELEMENT METHOD
(FEM) PENGARUH TOPOLOGI PEMOTONGAN INTI
TRANSFORMATOR TIGA FASA PADA KURVA
MAGNETISASI DAN ARUS INRUSH**

TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,

Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc. Daniar Fahmi, ST., MT.

NIP.1970071219980211001

NIP.198909252014041002

**SURABAYA
JULI 2015**

**EKSPERIMEN DAN SIMULASI FINITE ELEMENT METHOD
(FEM) PENGARUH TOPOLOGI PEMOTONGAN INTI
TRANSFORMATOR TIGA FASA PADA KURVA
MAGNETISASI DAN ARUS INRUSH**

Nama : Rahman Cahyadi putra
Pembimbing I : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
Pembimbing II : Daniar Fahmi, ST., MT.

ABSTRAK

Studi ini meneliti pengaruh topologi pemotongan inti transformator tiga fasa yang berbeda terhadap kurva magnetisasi dan arus inrush. Topologi pemotongan inti transformator yang diteliti terdiri dari transformator yang memiliki inti dengan cara potong A yaitu tersusun dari bentuk I atau persegi panjang dan transformator yang memiliki inti dengan cara potong B yaitu tersusun dari bentuk yoke-leg-center. Penelitian pengaruh topologi pemotongan inti transformator terhadap kurva magnetisasi beserta distribusi medan magnet dilakukan melalui simulasi *Finite-Element Method* (FEM) pada titik-titik sambungan antarpotongan inti. Hasil dari simulasi FEM digunakan untuk mencari arus inrush masing-masing transformator. Hasil penghitungan arus inrush dari simulasi kemudian dibandingkan dengan eksperimen pengukuran arus inrush. Keberadaan fluks sisa menjadi pertimbangan dalam pengukuran arus inrush, sehingga metode demagnetisasi digunakan untuk memperoleh arus inrush yang sebenarnya. Berdasarkan hasil simulasi dan eksperimen diperoleh bahwa topologi pemotongan inti transformator dapat berpengaruh pada kurva magnetisasi dan arus inrush. Ini dibuktikan dengan perbedaan kurva magnetisasi dan arus inrush kedua topologi pemotongan inti transformator.

Kata Kunci : Arus Inrush, Finite-Element Method, Kurva Magnetisasi, Topologi Pemotongan Inti, Transformator Tiga Fasa.

Halaman ini sengaja dikosongkan

***FINITE ELEMENT METHOD SIMULATION AND
EXPERIMENTAL OF CORE CUTTING TOPOLOGY OF THREE
PHASE TRANSFORMER EFFECT ON MAGNETIZATION
CURVE AND INRUSH CURRENT***

Name : Rahman Cahyadi Putra
1st Advisor : Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
2nd Advisor : Daniar Fahmi, ST., MT.

ABSTRACT

This study observes core cutting topology of three phase transformer effect on magnetization curve and inrush current. The studied topologies consist of core cutting A which is made up by letter I form or rectangular and core cutting B which is made up by yoke-leg-center. The study of core cutting topology effect on magnetization curve and magnetic field is done is researched by Finite-Element Method (FEM) simulation at the points of connection between the core pieces. The results of FEM simulation, then, is used to find inrush current of each transformer. Inrush current results of the simulation are compared to experimental measurements of inrush currents. The existence of residual flux or remanent flux is considered in inrush current measurement, so demagnetization method used to obtain the real inrush current value. Based on simulation and experimental results obtained that the topology of the transformer core cutting can affect the magnetization curves and inrush currents. These are proven by differences in the magnetization curve and inrush current of both topology transformer core cutting.

Key Words: *Core Cutting Topology, Finite-Element Method, Inrush Current, Magnetization curve, Three Phase Transformer.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Penulis menyampaikan syukur dan segala puji kepada Allah swt yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya. Shalawat serta salam selalu tercurahkan kepada rasulullah Muhammad saw, beserta keluarga, sahabat, seluruh umatnya. Dengan izin dan kehendak Allah, penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir **“Eksperimen dan Simulasi Finite Element Method (FEM) Pengaruh Topologi Pemotongan Inti Transformator Tiga Fasa Pada Kurva Magnetisasi dan Arus Inrush”** ini tepat waktu.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan menyelesaikan pendidikan sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pada Pelaksanaan dan penyelesaian Tugas Akhir ini saya mendapatkan bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak I Made Yulistya Negara dan Bapak Daniar Fahmi, atas segala curahan pengetahuannya dan waktunya dalam membimbing penulis sampai terselesaikannya Tugas Akhir ini.
2. Kedua Orang tua penulis, Fitrul Ansori, SE. Dan Ir. Endang Kurniasih, yang tiada henti memberikan nasihat, semangat, doa, dan dukungan materil kepada penulis sehingga Tugas Akhir ini bisa terselesaikan tepat pada waktunya.
3. Segenap keluarga Bani Kajoen yang senantiasa mendukung penulis secara moril maupun materil selama pelaksanaan Tugas Akhir ini.
4. Kedua adik penulis, Nurfani Riadi dan Annisa Salsabilla, yang selalu memberikan semangat, hiburan, dan pengorbanan kepada penulis selama mengerjakan Tugas Akhir.
5. Bapak Naryono, Mas Arif Budi, Mas Yoni, Mas Afif, Mas Yuda, Rudi Prasajo dan Syaiful Hak yang bersedia membantu dan memberikan solusi dalam proses pengerjaan Tugas Akhir ini.
6. Seluruh Dosen, dan Staff Karyawan Jurusan Teknik Elektro-FTI, ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.
7. Teman-teman Angkatan 2011 yang membantu penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir dan mendukung penulis untuk lulus di wisuda 112.
8. Teman-teman asisten dan angkatan TA Laboratorium Tegangan Tinggi yang sangat membantu dalam proses penyelesaian Tugas Akhir ini.

9. Teman-teman Laboratorium Konversi Energi senantiasa bersedia membantu penulis dalam penyelesaian Tugas Akhir.
10. Teman-teman pengurus BEM FTI ITS 2013/2014 dan BEM ITS 2014/2015 yang tak henti memberikan semangat dan hiburan selama penyelesaian Tugas Akhir ini.
11. Pihak-pihak lain yang telah bersedia mendengarkan keluh kesah dan memberikan dukungan kepada penulis.

Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini bermanfaat dan berguna bagi penulis khususnya dan juga bagi para pembaca pada umumnya.

Surabaya, Juli 2015

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman

HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xiii
 BAB 1 PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Sistematika Penulisan	3
 BAB 2 TRANSFORMATOR	 5
2.1 Konstruksi Transformator.....	5
2.2 Transformator Ideal.....	6
2.3 Transformator Tidak Ideal.....	7
2.3.1 Rangkaian Ekuivalen Transformator	8
2.3.2 Parameter Transformator	9
2.4 Transformator Tiga Fasa.....	11
2.5 Arus Inrush Pada Transformator.....	12
2.6 Rugi Pada Transformator.....	14
2.6.1 Rugi Histerisis	14
2.6.2 Rugi Tembaga.....	14
2.6.3 Rugi Arus Pusar (Eddy Current)	15
 BAB 3 PEMODELAN TRANSFORMATOR MENGGUNAKAN FINITE-ELEMENT METHOD DAN EKSPERIMEN PENGUKURAN ARUS INRUSH.....	 17
3.1 Spesifikasi Transformator Tiga Fasa	17
3.1.1 Parameter Inti Transformator Dengan Cara Potong A.	18
3.1.2 Parameter Inti Transformator Dengan Cara Potong B.	20
3.2 Pemodelan Transformator Menggunakan Finite-Element Method (FEM)	23

3.3	Kurva Magnetisasi	26
3.4	Eksperimen Pengukuran Arus Inrush	27
3.4.1	Perancangan Alat Pengukuran Arus Inrush	27
3.4.2	Perancangan Peralatan Demagnetisasi.....	30
3.4.2.1	Demagnetisasi dengan Shunt Capacitor	30
3.4.2.2	Demagnetisasi dengan Tegangan DC Variatif Frekuensi Konstan	32
BAB 4 ANALISIS SIMULASI DAN EKSPERIMEN.....		35
4.1	Distribusi Kerapatan Medan Magnet (B) dan Intensitas Medan Magnet (H)	35
4.1.1	Distribusi Kerapatan Medan Magnet (B).....	35
4.1.2	Distribusi Intensitas Medan Magnet (H).....	37
4.2	Perbandingan Kurva Magnetisasi Antarbentuk Potongan Inti Transformator	38
4.3	Pengaruh Cara Pemotongan Inti Transformator dengan Nilai Puncak Arus Inrush Hasil Simulasi	49
4.4	Pengaruh Cara Pemotongan Inti Transformator dengan Nilai Puncak Arus Inrush Hasil Eksperimen	54
4.4.1	Pengaruh Demagnetisasi dengan Shunt Capacitor Terhadap Arus Inrush	57
4.4.2	Pengaruh Demagnetisasi dengan Tegangan DC Variatif Frekuensi Konstan Terhadap Arus Inrush.....	71
BAB 5 PENUTUP		79
5.1	Kesimpulan	79
5.2	Saran.....	80
DAFTAR PUSTAKA		81
RIWAYAT HIDUP		83

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1	Spesifikasi Transformator..... 17
Tabel 3.2	Ukuran inti transformator dengan cara potong A 19
Tabel 3.3	Hasil pengujian transformator cara potong A tanpa beban 19
Tabel 3.4	Ukuran inti transformator dengan cara potong B 22
Tabel 3.5	Hasil pengujian transformator cara potong B tanpa beban 22
Tabel 3.6	Spesifikasi sumber daya tiga fasa 28
Tabel 3.7	Spesifikasi current Transformer 29
Tabel 3.8	Spesifikasi current probe 30
Tabel 3.9	Spesifikasi sumber AC tiga fasa variabel 34
Tabel 4.1	Daftar titik monitor kurva B-H 38
Tabel 4.2	Perbandingan nilai kerapatan medan magnet maksimum 48
Tabel 4.3	Perbandingan nilai intensitas medan magnet maksimum 49
Tabel 4.4	Nilai parameter arus inrush untuk inti transformator cara potong A 50
Tabel 4.5	Nilai parameter arus inrush untuk inti transformator cara potong B..... 50
Tabel 4.6	Nilai arus inrush untuk inti transformator cara potong A..... 51
Tabel 4.7	Nilai arus inrush untuk inti transformator cara potong B 52
Tabel 4.8	Perbandingan arus inrush antara cara potong A dan cara potong B..... 53
Tabel 4.9	Respon arus inrush terhadap demagnetisasi dengan shunt capacitor terhubung saat transformator beroperasi 59

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Transformator Tipe Inti	6
Gambar 2.2 Transformator Tipe Cangkang lilitan tidak saling menumpuk (a); Transformator Tipe Cangkang lilitan saling menumpuk (b).....	6
Gambar 2.3 Rangkaian ekivalen transformator	8
Gambar 2.4 Skema pengukuran transformator tanpa beban	10
Gambar 2.5 Skema rangkaian pengukuran transformator hubung singkat	10
Gambar 2.6 Transformator tiga fasa terdiri 3 unit transformator 1 fasa (a); Transformator tiga fasa terdiri 1 unit transformator tiga fasa (b)	12
Gambar 2.7 Fenomena hubungan arus inrush akibat pengaruh fluks	13
Gambar 3.1 Transformator tiga fasa dengan cara potong A; tampak depan (a), tampak atas (b), dan tampak samping (c)	18
Gambar 3.2 Bentuk inti transformator tiga fasa dengan cara potong A	18
Gambar 3.3 Transformator tiga fasa dengan cara potong B; tampak depan (a), tampak samping (b), tampak atas (c)	20
Gambar 3.4 Komponen potongan inti transformator tiga fasa dengan cara potong B; leg (a), center (b), yoke (c)	21
Gambar 3.5 Bentuk inti transformator tiga fasa dengan cara potong B	21
Gambar 3.6 Bentuk elemen tetrahedron penyusun mesh	23
Gambar 3.7 Konstruksi tiga dimensi transformator tiga fasa dengan cara potong A; tampak depan (a), tampak samping (b), tampak atas (c).....	24
Gambar 3.8 Konstruksi tiga dimensi transformator tiga fasa dengan cara potong B; tampak depan (a), tampak samping (b), tampak atas (c).....	25
Gambar 3.9 Konstruksi transformator tersusun tetrahedron mesh; cara potong A (a), cara potong B (b)	25
Gambar3.10 Kurva magnetisasi pada material berbeda	26
Gambar3.11 Kurva magnetisasi dan fluks sisa	26

Gambar3.12	Diagram 1 garis pengukuran arus inrush	28
Gambar3.13	Kelengkapan pengukuran arus inrush.....	28
Gambar3.14	Rangkaian demagnetisasi dengan shunt capacitor.....	31
Gambar3.15	Demagnetisasi dengan shunt capacitor.....	31
Gambar3.16	Kurva magnetisasi saat demagnetisasi.....	32
Gambar3.17	Bentuk gelombang DC variatif - frekuensi konstan	33
Gambar3.18	Rangkaian demagnetisasi [18]; komponen yang diperlukan (a), hubungan rangkaian demagnetisasi dengan transformator (b)	33
Gambar3.19	Bentuk fisik rangkaian demagnetisasi 3 fasa disertai kontrol arduino	33
Gambar 4.1	Rangkaian pengujian yang digunakan untuk menguji kedua gangguanDistribusi kerapatan medan magnet transformator dengan cara potong inti B pada; fasa 0° (a), fasa 90° (b).....	36
Gambar 4.2	Rangkaian pengujian yang digunakan untuk menguji kedua gangguanDistribusi kerapatan medan magnet transformator dengan cara potong inti A pada; fasa 0° (a), fasa 90° (b).....	36
Gambar 4.3	Distribusi kerapatan medan magnet pada; fasa 200° (a), fasa 30° (b).....	36
Gambar 4.4	Distribusi intensitas medan magnet pada; fasa 0° (a), fasa 120° (b), dan fasa 240°	37
Gambar 4.5	titik monitor pengamatan inti transformator.....	38
Gambar 4.6	Perbandingan kurva magnetisasi pada titik A	39
Gambar 4.7	Perbandingan kurva magnetisasi pada titik B	40
Gambar 4.8	Perbandingan kurva magnetisasi pada titik C	40
Gambar 4.9	Perbandingan kurva magnetisasi pada titik D	41
Gambar 4.10	Perbandingan kurva magnetisasi pada titik E.....	42
Gambar 4.11	Perbandingan kurva magnetisasi pada titik F	43
Gambar 4.12	Perbandingan kurva magnetisasi pada titik G	44
Gambar 4.13	Perbandingan kurva magnetisasi pada titik H	44
Gambar 4.14	Perbandingan kurva magnetisasi pada titik I	45
Gambar 4.15	Perbandingan kurva magnetisasi pada titik J.....	46
Gambar 4.16	Perbandingan kurva magnetisasi pada titik K	47
Gambar 4.17	Perbandingan kurva magnetisasi pada titik L.....	47
Gambar 4.18	Arus inrush pertama inti cara potong A fasa R	54
Gambar 4.19	Arus inrush pertama inti cara potong A fasa S.....	55
Gambar 4.20	Arus inrush pertama inti cara potong A fasa T.....	55

Gambar 4.21	Arus inrush pertama inti cara potong B fasa R	56
Gambar 4.22	Arus inrush pertama inti cara potong B fasa T; tanpa perbesaran (a); dan dengan perbesaran (b)	56
Gambar 4.23	Arus inrush pertama inti cara potong B fasa S	57
Gambar 4.24	Arus inrush inti potongan A sebelum didemagnetisasi	58
Gambar 4.25	Arus transformator dengan cara potong A saat terhubung shunt capacitor.....	58
Gambar 4.26	Arus inrush inti potongan B sebelum didemagnetisasi	59
Gambar 4.27	Arus transformator dengan cara potong B saat terhubung shunt capacitor.....	59
Gambar 4.28	Arus inrush hasil demagnetisasi pertama fasa R pada inti cara potong A	60
Gambar 4.29	Arus inrush hasil demagnetisasi pertama fasa S pada inti cara potong A	61
Gambar 4.30	Arus inrush hasil demagnetisasi pertama fasa T pada inti cara potong A	61
Gambar 4.31	Arus inrush hasil demagnetisasi kedua fasa R pada inti cara potong A	62
Gambar 4.32	Arus inrush hasil demagnetisasi kedua fasa S pada inti cara potong A	63
Gambar 4.33	Arus inrush hasil demagnetisasi kedua fasa T pada inti cara potong A	63
Gambar 4.34	Arus inrush hasil demagnetisasi ketiga fasa R pada inti cara potong A	64
Gambar 4.35	Arus inrush hasil demagnetisasi ketiga fasa S pada inti cara potong A	65
Gambar 4.36	Arus inrush hasil demagnetisasi ketiga fasa T pada inti cara potong A	65
Gambar 4.37	Arus inrush hasil demagnetisasi keempat fasa R pada inti cara potong A	66
Gambar 4.38	Arus inrush hasil demagnetisasi keempat fasa S pada inti cara potong A	67
Gambar 4.39	Arus inrush hasil demagnetisasi keempat fasa T pada inti cara potong A	67
Gambar 4.40	Arus inrush hasil demagnetisasi fasa R pada inti cara potong B	67

Gambar 4.41 Arus inrush hasil demagnetisasi fasa S pada inti cara potong B	68
Gambar 4.42 Arus inrush hasil demagnetisasi fasa T pada inti cara potong B	68
Gambar 4.43 Perbandingan arus inrush hasil demagnetisasi shunt capacitor pada fasa R.....	69
Gambar 4.44 Perbandingan arus inrush hasil demagnetisasi shunt capacitor pada fasa S	70
Gambar 4.45 Perbandingan arus inrush hasil demagnetisasi shunt capacitor pada fasa T.....	70
Gambar 4.46 Arus inrush sebelum demagnetisasi inti dengan cara potong A pada fasa R	71
Gambar 4.47 Arus inrush setelah demagnetisasi inti dengan cara potong A pada fasa R	71
Gambar 4.48 Arus inrush sebelum demagnetisasi inti dengan cara potong A pada fasa S.....	72
Gambar 4.49 Arus inrush setelah demagnetisasi inti dengan cara potong A pada fasa S.....	72
Gambar 4.50 Arus inrush sebelum demagnetisasi inti dengan cara potong A pada fasa T	73
Gambar 4.51 Arus inrush setelah demagnetisasi inti dengan cara potong A pada fasa T	73
Gambar 4.52 Arus inrush sebelum demagnetisasi inti dengan cara potong B pada fasa R	74
Gambar 4.53 Arus inrush setelah demagnetisasi inti dengan cara potong B pada fasa R	74
Gambar 4.54 Arus inrush sebelum demagnetisasi inti dengan cara potong B pada fasa S.....	75
Gambar 4.55 Arus inrush setelah demagnetisasi inti dengan cara potong B pada fasa S.....	76
Gambar 4.56 Arus inrush sebelum demagnetisasi inti dengan cara potong B pada fasa T.....	76
Gambar 4.57 Arus inrush setelah demagnetisasi inti dengan cara potong B pada fasa T.....	76
Gambar 4.58 Perbandingan nilai arus inrush hasil demagnetisasi pada inti cara potong A dengan inti cara potong B	77

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transformator merupakan peralatan yang sangat penting dalam sistem kelistrikan. Transformator berfungsi untuk menaikkan (*step up*) level tegangan yang dibangkitkan sistem pembangkitan sehingga dapat ditransmisikan pada jarak jauh. Transformator juga dapat berfungsi untuk menurunkan (*step down*) nilai tegangan dari sistem transmisi menuju sistem distribusi lokal sehingga daya listrik dapat digunakan oleh beban-beban listrik di rumah, perkantoran, hingga industri [1]. Oleh karena fungsi transformator yang penting dalam sistem kelistrikan, maka untuk menjaga transformator dari gangguan eksternal diperlukan sistem proteksi transformator.

Perancangan sistem proteksi yang terkait dengan transformator perlu memerhatikan beberapa fenomena karakteristiknya. Salah satu fenomena karakteristik transformator yang perlu diperhatikan adalah arus inrush (*Inrush Current*). Fenomena arus inrush pada transformator telah dibahas dalam beberapa beberapa literatur [2-7]. Fenomena arus inrush yang terjadi pada saat energisasi transformator menjadi hal yang perlu diperhatikan dalam desain dan performansi proteksi rele diferensial yang digunakan di dalam sistem kelistrikan. Perhatian itu dipengaruhi oleh kondisi transformator saat pertama kali dihubungkan dengan sumber tegangan arus magnetisasi dapat mencapai 10-20 kali arus rating, sedangkan dalam kondisi tunak (*steady state*) arus magnetisasi pada transformator hanya 1-2% dari arus rating saja [8].

Fenomena arus inrush dapat dianalisis melalui pengaruh kurva B-H pada inti besi transformator [9]. Analisis kurva B-H pada transformator tiga fasa menjadi tantangan karena perilaku elektromagnetiknya dalam kondisi transien maupun tunak berbeda secara signifikan dibandingkan transformator 1 fasa. Secara spesifik jalur fluks dan kopling magnetik yang lebih banyak pada inti tiga lengan menunjukkan perilaku yang berbeda dibandingkan dengan transformator 1 fasa [10]. Jarak sela udara (*air gap*) pada bagian inti dan penyambungan antarbagian inti juga memengaruhi besar saturasi magnet pada transformator [11]. Analisis pengaruh cara pemotongan inti transformator terhadap kurva magnetisasi dan arus inrush menggunakan simulasi perangkat lunak yang telah dilakukan menunjukkan kerapatan medan magnet maksimum

dan intensitas medan magnet maksimum dalam kurva magnetisasi tidak berbanding lurus dengan arus inrush maksimum. Hasil studi tersebut juga menunjukkan terdapat perbedaan nilai arus inrush maksimum pada cara potong inti transformator yang berbeda [12].

Berdasarkan uraian di atas, studi tugas akhir ini melakukan validasi hasil penelitian sebelumnya dengan mengangkat judul "*Eksperimen dan Simulasi Finite Element Method (FEM) Pengaruh Topologi Pemotongan Inti Transformator Tiga Fasa Pada Kurva Magnetisasi dan Arus Inrush.*" Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini berawal dari identifikasi topologi pemotongan inti besi yang umum digunakan pada transformator. Cara melakukan pemodelan potongan inti transformator pada perangkat lunak dan cara mendapatkan kurva magnetisasi dan arus inrush juga menjadi permasalahan yang akan diteliti, baik melalui metode simulasi FEM maupun eksperimen. Sehingga pengaruh topologi pemotongan inti besi terhadap kurva magnetisasi dan arus inrush pada transformator dapat dianalisis.

Penelitian pada tugas akhir ini bertujuan untuk mengetahui topologi inti besi apa saja yang umum digunakan pada transformator dan melihat kurva magnetisasi pada potongan inti transformator. Di samping itu penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh potongan inti transformator terhadap arus inrush. Penelitian yang dilakukan pada tugas akhir ini memiliki manfaat sebagai referensi dalam mempertimbangkan perancangan sistem proteksi kelistrikan terutama terkait peralatan transformator. Di samping itu penelitian ini juga bisa menjadi referensi dalam mempertimbangkan pemilihan maupun perancangan konstruksi transformator. Penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi referensi dalam mengembangkan penelitian transformator.

Metode penelitian yang dilakukan dalam studi Tugas Akhir ini antara lain mengumpulkan parameter-parameter yang digunakan dalam pembahasan Tugas Akhir. Parameter-parameter ini dapat diperoleh dari literatur dan objek transformator yang akan diamati. Parameter-parameter yang diperlukan dalam simulasi studi ini didasarkan pada data transformator yang akan diuji, antara lain: ukuran dari inti transformator, cara pemotongan inti transformator, tegangan yang diberikan pada belitan primer, arus belitan primer, jenis material inti, impedansi transformator dan jumlah lilitan. Sedangkan parameter-parameter yang diperlukan dalam eksperimen antara lain kapasitas daya transformator, dan arus rating transformator.

Langkah selanjutnya yakni memodelkan potongan inti transformator dengan menggunakan teknologi simulasi perangkat lunak berbasis metode Finite Element Analysis atau Finite Element Method. Simulasi inti transformator dilakukan untuk mengetahui distribusi medan pada potongan inti transformator terutama untuk parameter kerapatan medan magnet (B) dan intensitas medan magnet (H). Data hasil simulasi kemudian diolah untuk mendapatkan kurva magnetisasi dan nilai puncak arus inrush dengan menggunakan perhitungan matematis [13].

Hasil olah data simulasi kemudian dibandingkan dengan metode eksperimen laboratorium. Eksperimen laboratorium dilakukan untuk mengukur arus inrush pada transformator tiga fasa dengan kapasitas 3 kVA. Analisis akhir dilakukan dengan membandingkan hasil analisis dari metode simulasi dan metode eksperimen sehingga dapat ditarik simpulan yang akan menjawab permasalahan.

1.2 Sistematika Penulisan

Pada karya tugas akhir ini bab 1 membahas mengenai latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika penulisan, dan manfaat dari penelitian.

Bab 2 tugas akhir ini mengulas tentang teori transformator beserta karakteristiknya yang digunakan dalam pengerjaan penelitian ini.

Kemudian bab 3 menjelaskan mengenai pemodelan transformator menggunakan simulasi *Finite-Element Method* untuk mendapatkan kurva magnetisasi dan arus inrush berdasarkan perhitungan matematis. Dalam bab ini dijelaskan pula metode pengukuran yang digunakan untuk mendapatkan arus inrush maksimum pada transformator tiga fasa.

Pada bab 4 studi ini menguraikan analisis data hasil simulasi *Finite-Element Method* dan eksperimen terkait dengan pengaruh cara pemotongan inti transformator terhadap kurva magnetisasi dan arus inrush.

Kemudian pada bab 5 tugas akhir ini menyimpulkan hasil studi yang telah dilakukan dan saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

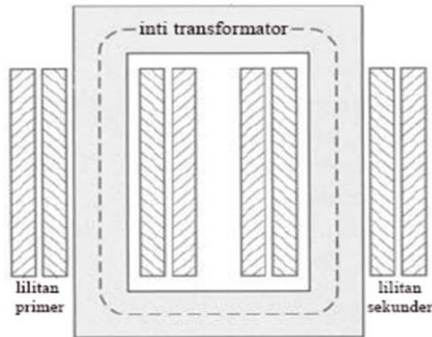
TRANSFORMATOR

Secara sederhana transformator terdiri dari 2 atau lebih lilitan kawat yang membungkus inti feromagnetik. Jika salah satu dari lilitan kawat tersebut terhubung dengan sumber tegangan bolak-balik maka sebuah fluks bolak-balik akan dihasilkan yang amplitudonya tergantung pada tegangan dan frekuensi sumber tegangan yang dihubungkan serta jumlah lilitan. Karena lilitan di sisi sumber tegangan dengan sisi yang lain tidak terhubung secara fisik namun terhubung secara magnetik maka dengan keberadaan fluks bolak-balik di sisi terhubung sumber tegangan maka fluks gandeng (*mutual flux*) akan muncul di antara lilitan. Fluks gandeng itu akan menginduksi lilitan di sisi lain sehingga muncul tegangan yang nilainya tergantung pada jumlah lilitan dan besar fluks gandeng serta frekuensinya.

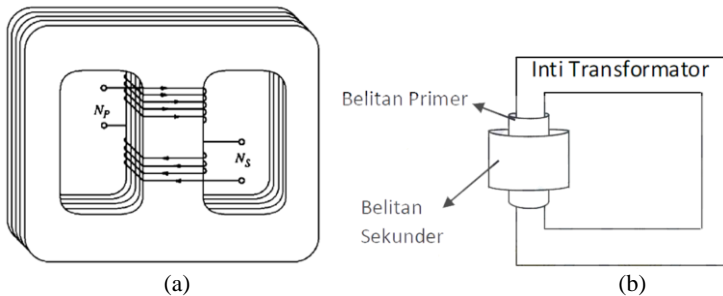
Prinsip kerja transformator hanya membutuhkan keberadaan fluks gandeng yang berubah terhadap waktu yang menghubungkan 2 sisi lilitan. Mekanisme kerja seperti itu dapat terjadi pada 2 lilitan yang dikopel melalui udara. Namun kopel antar lilitan dapat dibuat lebih efektif menggunakan inti berbahan ferromagnetik, karena banyak fluks mengalir yang dapat dibatasi pada jalur hubung antar lilitan yang ditentukan dan memiliki permeabilitas yang tinggi.

2.1 Konstruksi Transformator

Secara sederhana ada 2 tipe konstruksi transformator yang umum digunakan, antara lain tipe inti (*core-form*) dan tipe Cangkang (*shell-form*). Pada tipe inti, sebagaimana gambar 2.1, lilitan-lilitan digulung mengelilingi 2 lengan sebuah inti magnetik persegi. Dalam konstruksi tipe inti setiap lilitan terdiri dari 2 bagian, kumparan primer dan kumparan sekunder berada pada sisi lengan transformator yang berbeda. Sedangkan pada konstruksi tipe Cangkang, sebagaimana gambar 2.2 a, lilitan-lilitan digulung mengelilingi lengan tengah dari inti berlengan tiga yang bervariasi dan tidak saling menumpuk. Pada konstruksi tipe Cangkang lilitan primer dan sekunder juga dapat digulung saling menumpuk pada 1 lengan saja, sebagaimana gambar 2.2 b.



Gambar 2.1 Transformator Tipe Inti [14]



Gambar 2.2 Transformator Tipe Cangkang lilitan tidak saling menumpuk [1] (a); Transformator Tipe Cangkang lilitan saling menumpuk [12] (b)

2.2 Transformator Ideal

Terdapat sebuah hipotesis mengenai sifat-sifat transformator yang disebut sebagai transformator ideal. Sebuah transformator yang dinyatakan ideal memiliki sifat tidak ada energi yang diubah menjadi bentuk energi lain di dalam transformator sehingga daya listrik pada kumparan sekunder sama dengan daya listrik pada kumparan primer. Kondisi ini menandakan efisiensi pada transformator ideal adalah 100 persen. Hipotesis ini menggunakan asumsi antara lain resistansi lilitan diabaikan, semua fluks dibatasi pada inti dan terhubung pada 2 sisi lilitan (fluks bocor diabaikan), tidak ada rugi inti, dan permeabilitas inti sangat tinggi. Sifat-sifat tersebut hampir didekati namun tidak pernah secara nyata tercapai dalam aplikasi praktis transformator.

Berdasarkan asumsi dalam hipotesis transformator ideal, besar tegangan yang dihubungkan pada kumparan primer sama dengan gaya gerak listrik yang berubah terhadap waktu. Gaya gerak listrik tersebut memengaruhi besar fluks yang dihasilkan yang berubah terhadap waktu. Secara matematis kondisi ini dapat ditulis dalam persamaan 2.1.

$$V_1 = e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

Fluks yang dihasilkan pada kumparan primer mengalir melalui inti dan menginduksi kumparan sekunder, sehingga gaya gerak listrik muncul pada kumparan sekunder yang sebanding dengan nilai tegangan sekunder.

$$V_2 = e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

Jika diasumsikan fluks yang dihasilkan pada kumparan primer sama dengan yang dihasilkan pada kumparan sekunder maka :

$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{d\phi}{dt} \quad (2.3)$$

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (2.4)$$

2.3 Transformator Tidak Ideal

Dalam praktik transformator tidak dapat mengkonversi daya secara sempurna. Ada beberapa faktor yang menyebabkan kondisi tersebut terjadi, antara lain pengaruh resistansi kumparan, fluks bocor, dan arus eksitasi karena permeabilitas inti yang terbatas, bahkan nonlinier. Tidak seluruh fluks yang dihasilkan mengalir melalui kumparan sekunder. Ada beberapa bagian fluks yang mengalir pada suatu kumparan namun tidak mengalir ke kumparan yang lain namun mengalir bebas ke udara sehingga disebut fluks bocor. Kerugian daya lain yang terjadi saat transformator beroperasi adalah rugi inti. Rugi inti dipengaruhi oleh resistansi inti dan reaktansi magnetik yang terjadi pada inti transformator.

Permeabilitas rangkaian magnetik yang terbatas memengaruhi nilai arus yang dibutuhkan untuk menghasilkan gaya gerak magnet untuk mempertahankan fluks yang dibutuhkan transformator agar beroperasi. Arus dan gaya gerak magnet yang dibutuhkan sebanding dengan kerapatan fluks (B) yang terjadi pada inti transformator. Pernyataan ini berasal dari,

$$B = \mu H; B = \frac{\Phi}{A} \quad (2.5)$$

dimana A adalah luas permukaan inti ferromagnetik, m^2 dan H adalah gaya magnetisasi atau intensitas medan magnet. Nilai H diperoleh dari,

$$H = i \frac{l}{l} \quad (2.6)$$

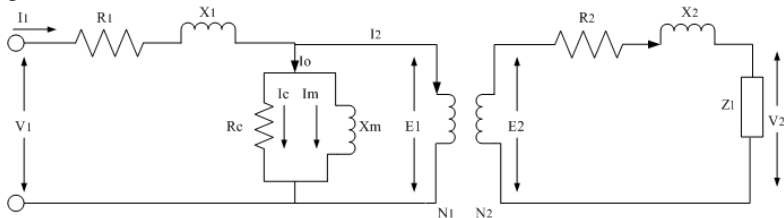
dimana l adalah panjang jalur magnetik inti transformator. Sehingga

$$\Phi = \int B \cdot dS = A\mu \frac{(i l)}{l} \quad (2.7)$$

Ketika kondisi saturasi dipertimbangkan dalam operasi transformator tidak ideal, arus yang diperlukan harus menyesuaikan dengan ketidaklinieran inti untuk menghasilkan tegangan. Arus tersebut juga dipengaruhi oleh reaktansi induktif dari rangkaian magnetisasi. Sehingga arus magnetisasi ini diperoleh dari tegangan suplai dibagi dengan reaktansi magnetisasi. Rangkaian magnetisasi ini menjadi rugi-rugi yang perlu diperhatikan karena rangkaian itu dapat mendisipasikan daya tergantung kerapatan fluks yang bekerja.

2.3.1 Rangkaian Ekuivalen Transformator

Berdasarkan praktik transformator dalam kondisi nyata yang tidak ideal, model rangkaian yang ekuivalen dengan transformator tersebut perlu dibuat dengan memerhatikan aspek yang lebih kompleks. Rangkaian ekuivalen ini digunakan untuk menganalisis kerja suatu transformator sesuai dengan kondisi nyata yang memerhatikan rugi-rugi belitan dan komponen magnetisasi inti, seperti reaktansi magnetisasi dan resistansi inti. Sehingga rangkaian ekuivalen transformator dapat diuraikan melalui gambar 2.3:



Gambar 2.3 Rangkaian ekuivalen transformator

Dengan menggunakan rangkaian ekivalen itu hubungan penjumlahan vektor dapat diketahui sebagai berikut:

$$V_1 = E_1 + I_1 R_1 + I_1 X_1 \quad (2.8)$$

$$E_2 = V_2 + I_2 R_2 + I_2 X_2 \quad (2.9)$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \text{ atau } E_1 = aE_2 \quad (2.10)$$

Dari persamaan 2.9 dan 2.10 diperoleh persamaan :

$$E_1 = a(I_2 Z_L + I_2 R_2 + I_2 X_2) \quad (2.11)$$

Karena :

$$\frac{I'_2}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \text{ atau } I_2 = aI'_2 \quad (2.12)$$

Maka :

$$E_1 = a^2 I'_2 Z_L + a^2 I'_2 R_2 + a^2 I'_2 X_2 \quad (2.13)$$

Sehingga :

$$V_1 = a^2 I'_2 Z_L + a^2 I'_2 R_2 + a^2 I'_2 X_2 + I_1 R_1 + I_1 X_1 \quad (2.14)$$

Dengan penyederhanaan rangkaian, maka diperoleh :

$$R_{eq} = R_1 + (N_1/N_2)^2 \cdot R_2 \quad (2.15)$$

$$X_{eq} = X_1 + (N_1/N_2)^2 \cdot X_2 \quad (2.16)$$

Dimana :	V_1 = Tegangan primer (V)	V_2 = Tegangan sekunder (V)
	E_1 = ggl primer (V)	E_2 = ggl sekunder (V)
	R_1 = Hambatan primer (Ω)	R_2 = Hambatan sekunder (Ω)
	I_1 = Arus primer (A)	I_2 = Arus sekunder (A)
	X_1 = Reaktansi primer (Ω)	X_2 = Reaktansi sekunder (Ω)
	N_1 = Jumlah lilitan primer	N_2 = Jumlah lilitan sekunder
	Z_L = Impedansi beban (Ω)	a = Konstanta

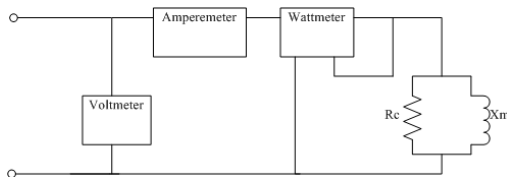
2.3.2 Parameter Transformator

Rangkaian ekivalen transformator dapat diperoleh dengan mengetahui parameter transformator. Parameter tersebut dapat diketahui dengan melakukan pengukuran tanpa beban dan pengukuran hubung singkat. Pengukuran tanpa beban digunakan untuk mengetahui

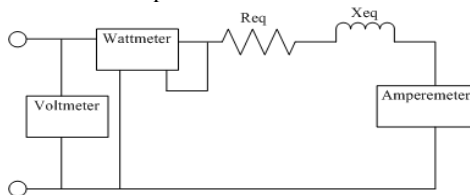
parameter inti transformator. Pengukuran hubung singkat dilakukan untuk mengetahui parameter belitan transformator.

Pengukuran kondisi tanpa beban digunakan untuk memperoleh nilai dari parameter inti, R_c dan X_m . Dalam keadaan tanpa beban bila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan V_p , maka hanya I_0 yang mengalir dari pengukuran daya yang masuk (P_p). Karena nilai impedansi lilitan di kumparan primer jauh lebih kecil dibandingkan nilai impedansi inti maka nilai impedansi lilitan pada pengukuran ini dapat diabaikan. Skema pengukuran transformator tanpa beban dapat dilihat pada gambar 2.4.

Pengukuran hubungan singkat diperlukan untuk menentukan nilai R_{eq} dan X_{eq} . Pengukuran hubungan singkat dilakukan dengan menghubungkan sisi sekunder dengan impedansi yang bernilai sangat kecil hingga mendekati nol, sehingga hanya impedansi $Z_{eq} = R_{eq} + jX_{eq}$ yang membatasi arus. Ketika pengukuran hubung singkat dilakukan, nilai tegangan yang diberikan harus dijaga pada nilai yang kecil sebab nilai dari R_{eq} dan X_{eq} relatif kecil sehingga arus yang timbul tidak melebihi nilai nominal dari rating transformator. Tegangan di sisi sekunder pada pengukuran hubung singkat yang relatif kecil menyebabkan tegangan jatuh pada R_c dan / atau X_m sangat kecil pula, sehingga nilainya dapat diabaikan. Oleh karena itu tegangan yang diperoleh merupakan tegangan pada Z_{eq} . Skema pengukuran transformator tanpa beban dapat dilihat melalui gambar 2.5.



Gambar 2.4 Skema pengukuran transformator tanpa beban



Gambar 2.5 Skema rangkaian pengukuran transformator hubung singkat

Berdasarkan skema pengukuran transformator tanpa beban, maka diperoleh :

$$R_c = 1 / \left(\left| \frac{I_{oc}}{V_{oc}} \right| \cos \theta \right) \quad (2.17)$$

$$X_m = 1 / \left(\left| \frac{I_{oc}}{V_{oc}} \right| \sin \theta \right) \quad (2.18)$$

dimana R_c = Resistansi inti(Ohm)
 V_{oc} = Tegangan primer tanpa beban (Volt)
 I_{oc} = Arus Primer tanpa beban (Ampere)
 X_m = Reaktansi magnetisasi (Ohm)

Berdasarkan skema pengukuran transformator hubung singkat di atas, maka diperoleh :

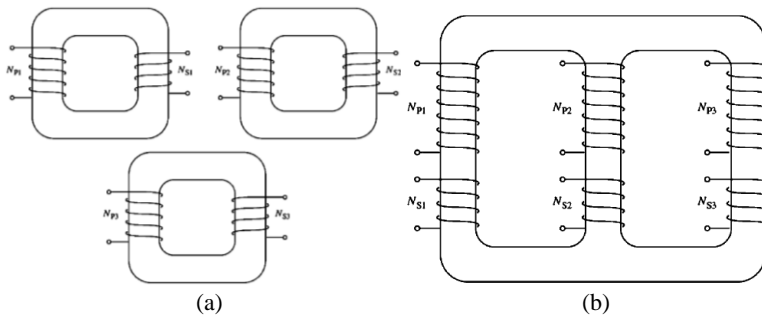
$$R_{eq} = \left| \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \right| \cos \theta \quad (2.19)$$

$$X_{eq} = \left| \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \right| \sin \theta \quad (2.20)$$

dimana R_{eq} = Resistansi ekivalen (Ohm)
 X_{eq} = Reaktansi ekivalen (Ohm)
 V_{sc} = Tegangan primer hubung singkat (Volt)
 I_{sc} = Arus Primer hubung singkat (Ampere)

2.4 Transformator Tiga Fasa

Transformator tiga fasa dibuat untuk memenuhi kebutuhan sistem kelistrikan tiga fasa. Transformator tiga fasa dapat dibuat melalui salah satu dari 2 cara. Cara pertama adalah menghubungkan 3 unit transformator satu fasa. Cara yang lain ialah dengan membuat 1 unit transformator tiga fasa yang terdiri dari 3 pasang lilitan yang digulung mengelilingi tiga lengan. Konstruksi transformator tiga fasa secara umum dapat dilihat pada gambar 2.6. Secara umum transformator tiga fasa memiliki 3 cara untuk menyambung rangkaian listrik tiga fasa, yakni hubungan bintang (Wye / Y), hubungan delta, dan hubungan zig-zag. Sehingga hubungan antara kumparan primer dan sekunder dapat dilakukan dengan empat kombinasi pilihan, yaitu koneksi Y- Δ ; Koneksi Y-Y; Koneksi Δ -Y; dan Koneksi Δ - Δ . Pada transformator tiga fasa, antar belitannya memiliki beda fasa 120° . Sedangkan tipe wye (Y) dan delta (Δ) memiliki beda fasa 30° .



Gambar 2.6 Transformator tiga fasa terdiri 3 unit transformator 1 fasa (a); Transformator tiga fasa terdiri 1 unit transformator tiga fasa (b)

2.5 Arus Inrush Pada Transformator

Saat sumber daya AC dihubungkan ke transformator pertama kali maka akan muncul arus yang mengalir ke lilitan yang terhubung sumber, meskipun kumparan sekunder tidak terhubung. Arus ini disebut sebagai arus inrush. Arus ini diperlukan untuk energisasi transformator pertama kali yaitu untuk menghasilkan fluks pada inti ferromagnetik. Arus tersebut merupakan arus transien yang bernilai 10 sampai 20 kali lebih besar daripada nilai arus rating transformator. Arus ini diperlukan sampai nilai maksimum fluks mencapai kondisi tunak dan inti menjadi jenuh. Arus inrush terdiri dari 2 bagian antara lain arus magnetisasi, yakni arus yang diperlukan untuk menghasilkan fluks pada inti transformator, dan arus rugi inti, yakni arus yang diperlukan untuk rugi histerisis dan rugi arus eddy terjadi.

Arus inrush terjadi di dalam transformator ketika fluks sisa tidak memenuhi nilai sesaat fluks dalam kondisi tunak, terutama pada titik-titik gelombang tegangan tertentu. Laju perubahan fluks sesaat di dalam transformator sebanding dengan jatuh tegangan sesaat pada lilitan yang terhubung sumber. Selama transformator beroperasi secara kontinyu, level fluks puncak berada nilai negatif saat tegangan berada pada titik nol. Namun selama energisasi fluks harus bermula pada titik nol. Sehingga untuk menaikkan tegangan dari nol fluks magnet akan mencapai nilai puncak berkali lipat dibandingkan dengan kondisi normal. Akibat ketidaklinieran karakteristik kurva magnetisasi, pada kondisi saturasi jumlah gaya gerak magnet yang tidak sebanding dibutuhkan untuk membangkitkan fluks magnet. Sehingga arus

kumparan yang dibutuhkan untuk membuat gaya gerak magnet agar dapat menimbulkan fluks pada inti transformator akan meningkat dibandingkan pada kondisi normal. Fenomena hubungan arus inrush akibat pengaruh fluks dapat dilihat pada gambar 2.7.

Nilai puncak arus inrush merupakan sebuah fungsi yang tersusun dari tegangan suplai, kerapatan medan magnet sisa, dan kerapatan medan magnet saturasi, resistansi lilitan primer dan induktansi transformator. Berdasarkan studi [13] nilai puncak arus inrush dapat diperoleh berdasarkan parameter-parameter transformator dalam kondisi beroperasi. Sehingga secara matematis nilai arus inrush didapatkan melalui persamaan :

$$i_{max} = \frac{\sqrt{2}V_m}{\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}} \left(\frac{2.B_n + B_r + B_s}{B_n} \right) \quad (2.21)$$

Dimana,

V_m = tegangan terhubung maksimum (Volt)

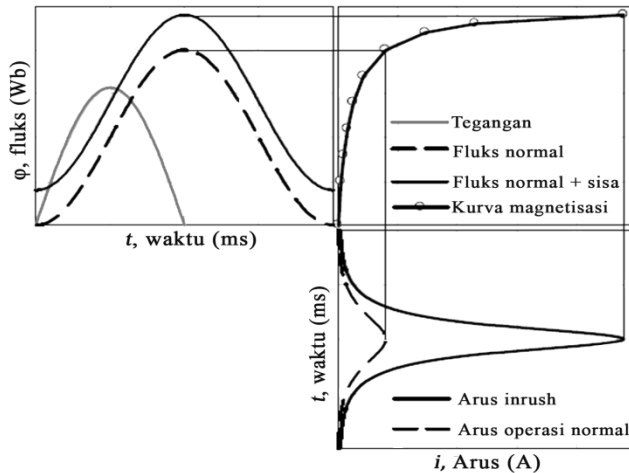
L = induktansi transformator (Henry)

R = resistansi total transformator (Ohm)

B_n = kerapatan medan magnet normal transformator (Weber/m²)

B_r = kerapatan medan magnet sisa transformator (Weber/m²)

B_s = kerapatan medan magnet jenuh transformator (Weber/m²)



Gambar 2.7 Fenomena hubungan arus inrush akibat pengaruh fluks

Kerapatan medan magnet normal diperoleh pada saat transformator beroperasi normal. Sedangkan kerapatan medan magnet sisa (Br) dan kerapatan medan magnet jenuh (Bs) diperoleh berdasarkan permeabilitas inti transformator. Sehingga pada jenis material yang berbeda nilai arus inrush dapat dimungkinkan berbeda. Di samping itu kedua parameter tersebut juga didasarkan pada kurva magnetisasi, terutama untuk memperoleh nilai Br yang tampak pada saat intensitas medan magnet bernilai nol. Gambar 2.7 menunjukkan keberadaan fluks sisa maupun fluks sementara (*remanent flux*) dapat menambah nilai fluks normal. Pernyataan ini seiring dengan persamaan 2.21. Oleh sebab uraian persamaan 2.21 dan gambar 22.7, kurva magnetisasi dan keberadaan fluks pada transformator memiliki keterkaitan dengan nilai arus inrush.

2.6 Rugi Pada Transformator

2.6.1 Rugi Histerisis

Histeresis merupakan fluks magnet tertinggal atau tersisa karena penarikan atau penurunan nilai magnetisasi. Kurva histeresis dapat dipengaruhi dan menunjukkan karakteristik bahan magnetik suatu inti. Rugi histerisis muncul fenomena histerisis yang terjadi pada material inti. Rugi histerisis akan meningkatkan nilai arus eksitasi. Dengan nilai arus yang meningkat maka nilai rugi akan semakin besar. Besar rugi histerisis dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$P_h = k_h \cdot f^2 \cdot B_{max}^n \quad (2.22)$$

dimana, P_h = Rugi arus histerisis [w/kg]

k_h = Konstanta material inti

f = frekuensi [Hz]

B_{max} = Nilai puncak medan magnet [T]

n = Nilai eksponensial, tergantung material dan Bmax

2.6.2 Rugi Tembaga

Rugi tembaga disebabkan terdapat nilai resistansi sebuah konduktor yang digunakan sebagai lilitan. Nilai rugi tembaga dapat dihitung dengan persamaan berikut

$$P_{cu} = I_{cu}^2 \cdot R_{cu} \quad (2.23)$$

dimana P_{cu} = Rugi konduktor (Watt)

I_{cu} = Arus pada kumparan (Ampere)

R_{cu} = Resistansi kumparan (Ohm)

2.6.3 Rugi Arus Pusar (Eddy Current)

Arus pusar (*Eddy Current*) adalah arus yang terdapat pada inti disebabkan tegangan yang diinduksi oleh fluks. Arus pusar yang mengalir pada inti transformator mempunyai nilai resistansi yang dapat menghasilkan panas. Panas yang terjadi secara terus menerus pada inti transformator dapat mengakibatkan kerusakan fisik material inti. Secara matematis nilai rugi arus pusar dapat diperoleh melalui persamaan:

$$P_e = k_e \cdot f^2 \cdot t^2 \cdot B_{max}^2 \quad (2.24)$$

dimana P_e = Rugi arus pusar [w/kg]
 k_e = Konstanta material inti
 f^2 = frekuensi
 t = ketebalan material [m]
 B_{max}^2 = Nilai puncak medan magnet [T]

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

PEMODELAN TRANSFORMATOR MENGUNAKAN FINITE-ELEMENT METHOD DAN EKSPERIMEN PENGUKURAN ARUS INRUSH

Pada bab ini metodologi penelitian yang digunakan terdiri dari simulasi transformator tiga fasa menggunakan perangkat lunak dan eksperimen pengukuran arus inrush. Simulasi transformator dilakukan menggunakan perangkat lunak berbasis *finite-element method*. Sedangkan eksperimen pengukuran arus inrush dilakukan dengan perlengkapan peralatan untuk memperoleh nilai dan bentuk gelombang arus inrush serta mengurangi keberadaan fluks sisa.

3.1 Spesifikasi Transformator Tiga Fasa

Dalam tugas akhir ini transformator yang digunakan sebagai objek penelitian adalah transformator tiga fasa yang memiliki topologi pemotongan inti yang berbeda. Ada 2 transformator dengan beda topologi pemotongan inti yang dibandingkan, yakni transformator dengan cara potong A dan transformator dengan cara potong B. Inti transformator dengan cara potong A terdiri dari 5 komponen yang berbentuk persegi panjang atau berbentuk I. Sedangkan inti transformator dengan cara potong B memiliki 3 komponen berupa yoke, leg dan center.

Kedua transformator yang digunakan dalam penelitian ini memiliki beberapa parameter yang sama, antara lain jumlah belitan, besarnya arus, dimensi inti, dan tegangan yang terukur pada masing-masing kumparan. Tabel 3.1 menunjukkan spesifikasi objek transformator penelitian ini.

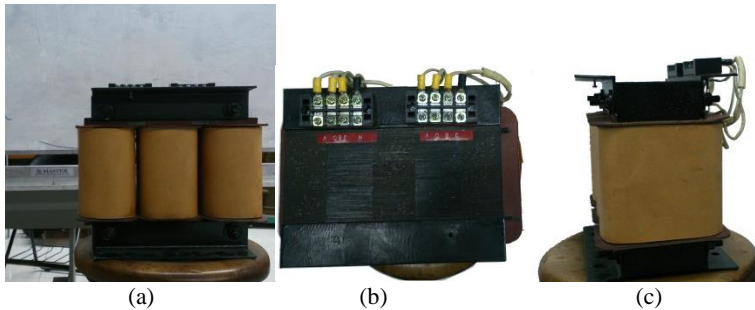
Tabel 3.1 Spesifikasi Transformator

Spesifikasi Transformator	
Fasa	3 Fasa
Kapasitas Daya	3000 VA
Tegangan Primer	380 Volt
Tegangan Sekunder	380 Volt
Hubungan Lilitan	Y-Y
Jumlah Lilitan Primer	300
Jumlah Lilitan Sekunder	300
Resistansi Lilitan	0.024 Ohm / fasa

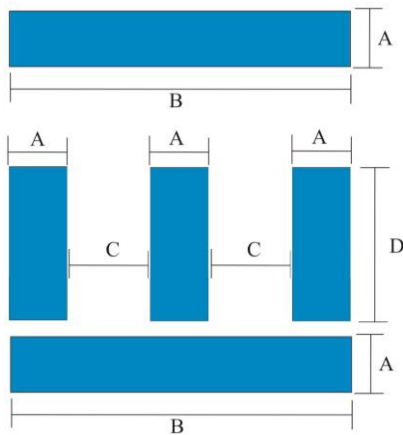
3.1.1 Parameter Inti Transformator Dengan Cara Potong A

Transformator dengan cara potong A memiliki parameter inti spesifik yang terdiri dari dimensi, bentuk potongan inti, resistansi inti, dan reaktansi magnetik. Dimensi dan bentuk potongan inti diperoleh melalui pengukuran fisis objek transformator. Resistansi inti dan reaktansi magnetik diperoleh melalui pengujian transformator tanpa beban.

Penampakan transformator 3 fasa dengan cara potong A ditunjukkan pada gambar 3.1. Spesifikasi dimensi dan bentuk potongan inti hasil pengukuran fisis diuraikan melalui gambar 3.2 dan tabel 3.2.



Gambar 3.1 Transformator tiga fasa dengan cara potong A; tampak depan (a), tampak atas (b), dan tampak samping (c)



Gambar 3.2 Bentuk inti transformator tiga fasa dengan cara potong A

Tabel 3.2 Ukuran inti transformator dengan cara potong A

Dimensi Potongan I	Ukuran
A	4 cm
B	21 cm
C	4.5 cm
D	17 cm
Ketebalan	9 cm

Tabel 3.3 Hasil pengujian transformator cara potong A tanpa beban

Parameter transformator cara potong A tanpa beban						
Vp (Volt)	Ip (Ampere)	Pp (Watt)	cos θ	Rc (ohm)	Xm (ohm)	Zt (ohm)
30	0.021	0.03	0.0476	30,000	1,430.2	30,034
60	0.034	0.045	0.022	80,000	1,765	80,019.5
90	0.04	0.114	0.032	71,053	2,251	71,088.3
120	0.048	0.105	0.0182	137,143	2,500.42	137,166
150	0.054	0.12	0.0148	187,500	2,778	187,520.6
180	0.068	0.18	0.0147	180,000	2,647.4	180,019.5
210	0.085	0.255	0.0142	172,941	2,470.84	172,959

Setelah melalui pengujian transformator tanpa beban, resistansi inti dan reaktansi magnetik memiliki nilai sebagaimana tertera pada tabel 3.3. Berdasarkan hasil pengujian transformator tanpa beban impedansi minimum transformator dengan cara potong A bernilai 30,034 ohm pada tegangan terhubung senilai 30 Volt. Sedangkan impedansi maksimum transformator dengan cara potong A bernilai 187,520.6 ohm pada level tegangan terhubung 150 Volt. Impedansi rata-rata transformator diperoleh sebagai berikut.

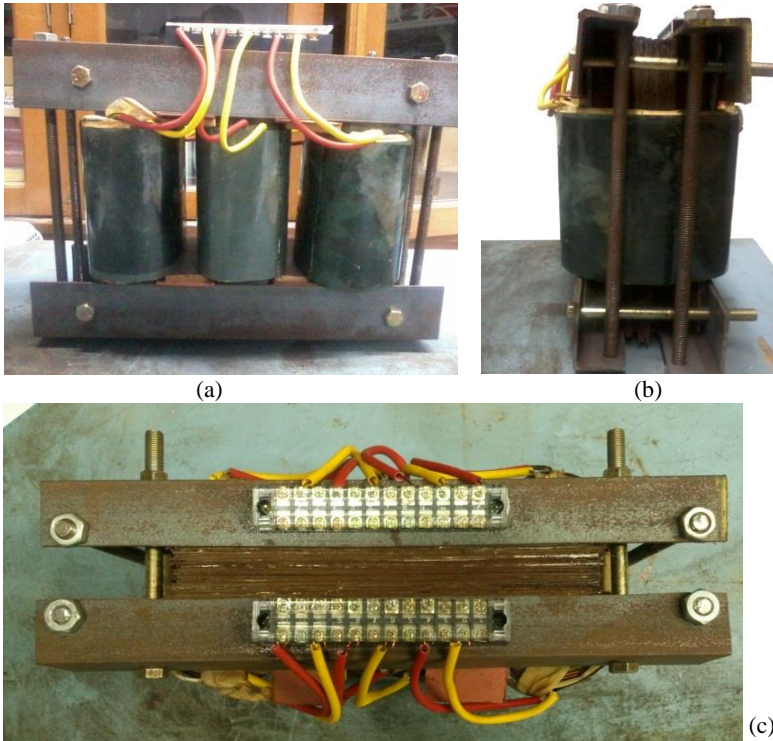
$$Z_{avg} = \frac{(30,034+80,019.5+71,088.3+137,166+187,520.6+180,019.5+172,959)}{7} \quad (3.1)$$

$$Z_{avg} = 122,686.7 \text{ ohm} \quad (3.2)$$

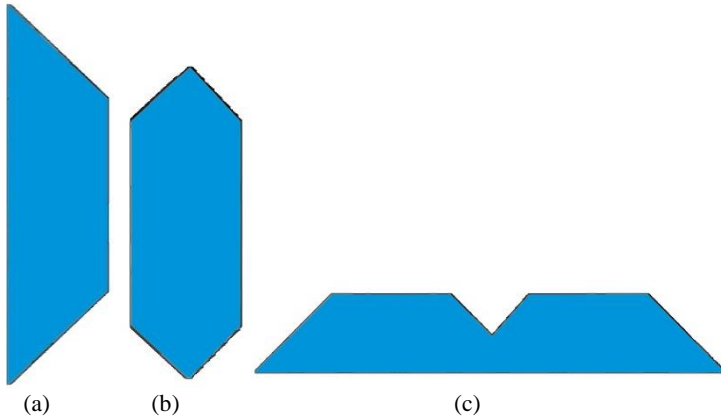
3.1.2 Parameter Inti Transformator Dengan Cara Potong B

Transformator dengan cara potong B memiliki parameter inti spesifik yang terdiri dari dimensi, bentuk potongan inti, resistansi inti, dan reaktansi magnetik. Dimensi dan bentuk potongan inti diperoleh melalui pengukuran fisis objek transformator. Resistansi inti dan reaktansi magnetik diperoleh melalui pengujian transformator tanpa beban.

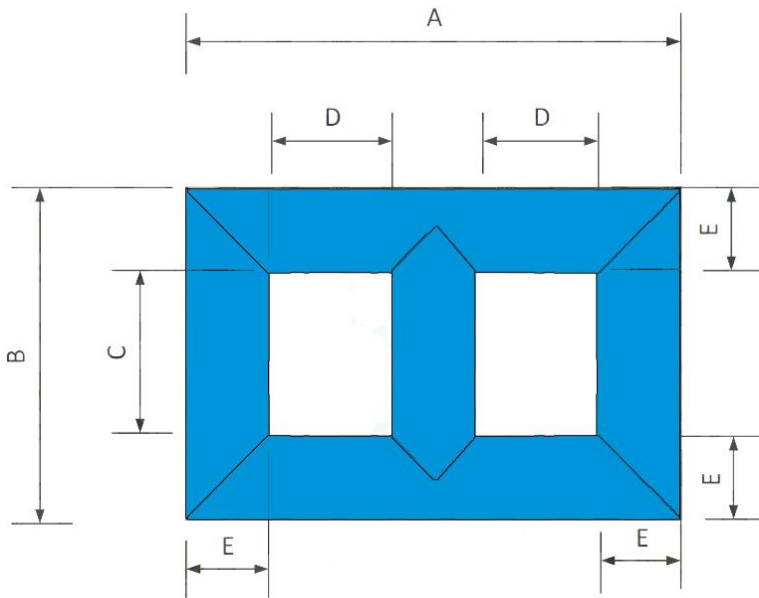
Penampakan transformator 3 fasa dengan cara potong B ditunjukkan pada gambar 3.3. Spesifikasi dimensi dan bentuk potongan inti hasil pengukuran fisis diuraikan melalui gambar 3.4, gambar 3.5 dan tabel 3.4.



Gambar 3.3 Transformator tiga fasa dengan cara potong B; tampak depan (a), tampak samping (b), tampak atas (c)



Gambar 3.4 Komponen potongan inti transformator tiga fasa dengan cara potong B; leg (a), center (b), yoke (c)



Gambar 3.5 Bentuk inti transformator tiga fasa dengan cara potong B

Tabel 3.4 Ukuran inti transformator dengan cara potong B

Dimensi Potongan Yoke-Leg-Center	Ukuran
A	21 cm
B	21 cm
C	13 cm
D	4.5 cm
E	4 cm
ketebalan	9 cm

Tabel 3.5 Hasil pengujian transformator cara potong B tanpa beban

Parameter Pengujian transformator cara potong A tanpa beban						
Vp (Volt)	Ip (Ampere)	Pp (Watt)	cos θ	Rc (ohm)	Xm (ohm)	Zt (ohm)
30	0.42	0.42	0.0333	2,142.86	(71.47)	2,144.05
60	0.85	1.08	0.0212	3,333.33	(70.60)	3,334.08
90	1.35	2.55	0.0210	3,176.47	(66.68)	3,177.17
120	1.8	4.8	0.0222	3,000	(66.68)	3,000.74
150	2.3	8.1	0.0235	2,777.78	(65.24)	2,778.54
180	3.8	10.5	0.0154	3,085.71	(47.37)	3,086.08
210	3.6	15.6	0.0206	2,826.92	(58.35)	2,827.53

Setelah melalui pengujian transformator tanpa beban, resistansi inti dan reaktansi magnetik memiliki nilai sebagaimana tertera pada tabel 3.5. Berdasarkan hasil pengujian transformator tanpa beban impedansi minimum transformator dengan cara potong B bernilai 2,144.05 ohm pada tegangan terhubung senilai 30 Volt. Sedangkan impedansi maksimum transformator dengan cara potong B bernilai 3,334.08 ohm pada level tegangan terhubung 60 Volt. Impedansi rata-rata transformator diperoleh sebagai berikut.

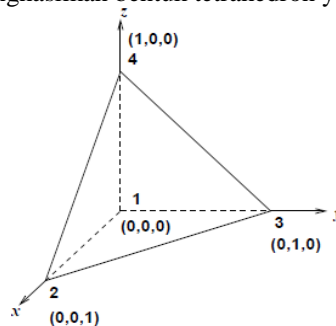
$$Z_{avg} = \frac{(2,144.05+3,334.08+3,177.17+3,000.74+2,778.54+3,086.08+2,827.53)}{7} \quad (3.3)$$

$$Z_{avg} = 2,906.88 \text{ ohm} \quad (3.4)$$

3.2 Pemodelan Transformator Menggunakan Finite-Element Method (FEM)

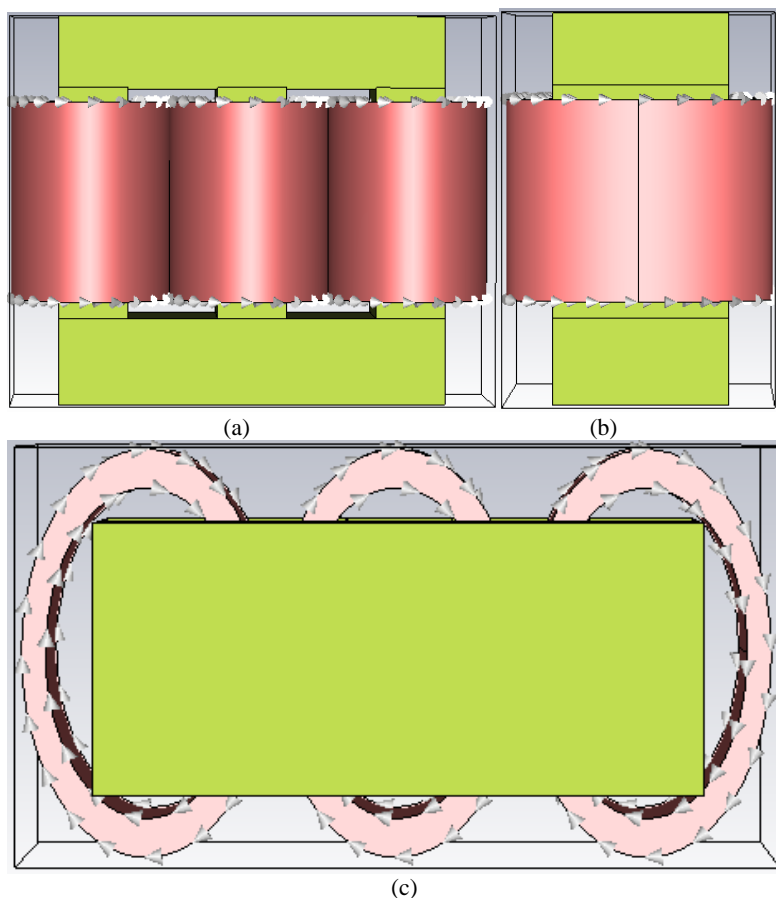
Finite-Element Method (FEM) atau metode elemen hingga adalah salah satu metode numerik yang bisa digunakan untuk menyelesaikan permasalahan termal, struktural, dan elektromagnetik. Melalui metode ini seluruh masalah yang kompleks seperti variasi bentuk, kondisi batas dan beban diselesaikan dengan metode pendekatan. FEM dapat digunakan untuk menyelesaikan komputasi elemen tiga dimensi melalui komputasi elemen-elemen atau subdomain-subdomain yang menyusun dimensi suatu objek. Berdasarkan mekanisme tersebut, FEM menjadi sebuah metode penyelesaian bilangan kontinu yang diterapkan pada komputer, sebab persamaan pada bilangan kontinu tidak dapat diselesaikan secara langsung oleh komputer.

Perambatan gelombang elektromagnet melalui suatu medium merupakan salah satu fenomena fisis yang mempunyai bentuk persamaan diferensial, sehingga FEM dapat digunakan untuk memodelkan fenomena ini. Model transformator yang memiliki suatu volume dibagi ke dalam bentuk volume elemen / mesh yang lebih kecil dalam jumlah yang banyak. Kemudian komputer melakukan penyelesaian sebuah kesatuan persamaan linier dalam jumlah besar dari elemen-elemen yang lebih kecil. Terdapat beberapa bentuk mesh yang sering digunakan dalam penyelesaian FEM. Salah satu mesh yang sering digunakan adalah bentuk tetrahedron. Mesh tetrahedron merupakan sebuah bentuk tiga dimensi yang terdiri dari empat buah vertex. Masing-masing volume menghasilkan bentuk tetrahedron yang berbeda.

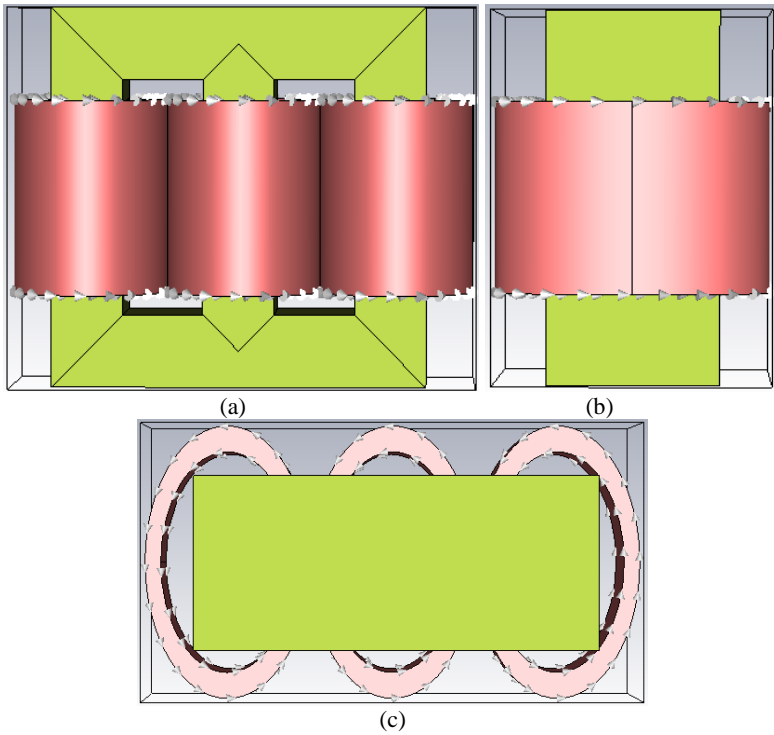


Gambar 3.6 Bentuk elemen tetrahedron penyusun mesh [15]

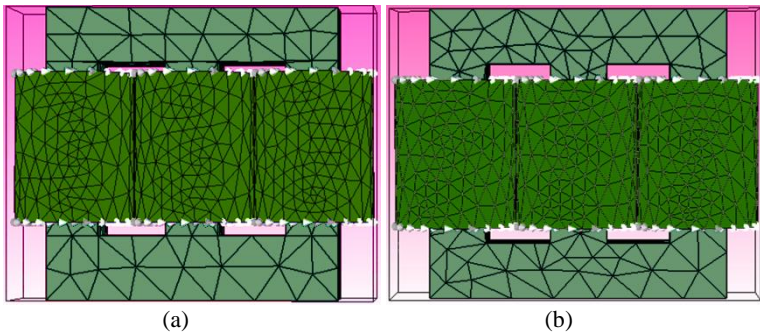
Pemodelan transformator melalui perangkat lunak dimulai dengan mendesain konstruksi tiga dimensi transformator, baik dengan cara potong A maupun dengan cara potong B. Model transformator tersebut, kemudian, dikomputasi menggunakan *Finite-Element Method* dengan mesh tetrahedron untuk mencari nilai B dan nilai H. Berikut ini merupakan gambar pemodelan transformator dengan simulasi perangkat lunak berbasis *Finite-Element Method*.



Gambar 3.7 Konstruksi tiga dimensi transformator tiga fasa dengan cara potong A; tampak depan (a), tampak samping (b), tampak atas (c)



Gambar 3.8 Konstruksi tiga dimensi transformator tiga fasa dengan cara potong B; tampak depan (a), tampak samping (b), tampak atas (c)

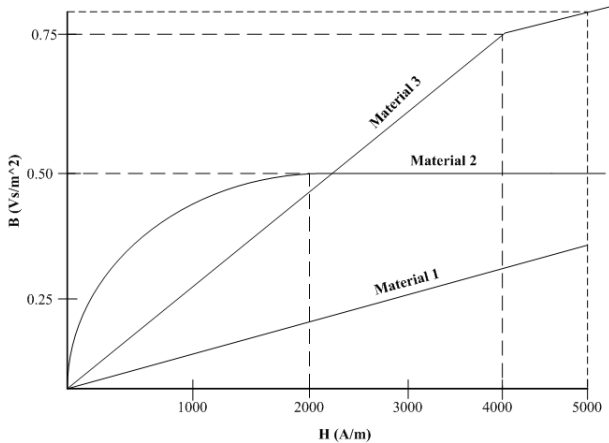


Gambar 3.9 konstruksi transformator tersusun tetrahedron mesh; cara potong A (a), cara potong B (b)

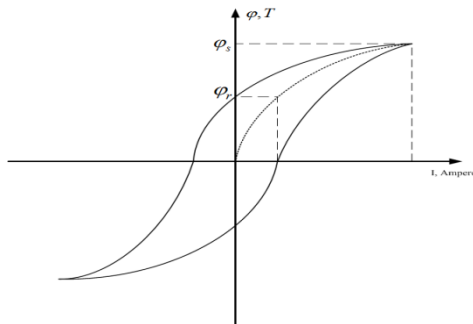
3.3 Kurva Magnetisasi

Kurva magnetisasi menggambarkan hubungan antara kerapatan medan magnet, B , dan intensitas medan magnet, H . Kurva ini dapat menunjukkan pengaruh kerapatan medan magnet, B , yang terjadi pada inti transformator akibat kenaikan intensitas medan magnet H . Pengaruh tersebut dalam Kurva magnetisasi dapat diamati melalui ilustrasi pada Gambar 3.10.

Berdasarkan ilustrasi pada Gambar 3.10 tampak bahwa ada perbedaan kenaikan dan titik saturasi kerapatan medan magnet terhadap kenaikan intensitas medan magnet. Pada ilustrasi berikut jenis material yang memiliki permeabilitas berbeda mempunyai kurva magnetisasi yang berbeda.



Gambar 3.10 Kurva magnetisasi pada material berbeda



Gambar 3.11 Kurva magnetisasi dan fluks sisa

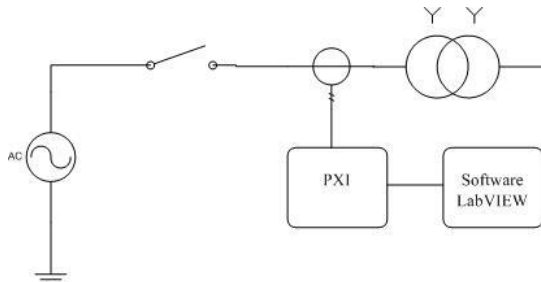
Arah arus yang bolak-balik mengakibatkan arah medan magnet juga turut bolak-balik dari $+H$ menjadi $-H$. Kondisi ini juga berlaku pada kerapatan fluks yang mengalami perubahan polaritas menjadi $+B$ atau $-B$. Arus bermula dari nilai 0 ketika inti tidak memperoleh pengaruh kemagnetan. Nilai positif dari H meningkatkan nilai B hingga saturasi pada $+B_{max}$. Nilai H kemudian turun menjadi 0, namun kerapatan medan magnet, B , tidak menjadi yang berarti masih terdapat fluks sisa pada inti. Sekarang arus yang digunakan untuk magnetisasi. Demikian juga jika arus berbalik dari $-H$ menuju $+H$, masih terdapat fluks sisa. Fenomena ini dipengaruhi oleh sifat histerisis bahan inti. Kurva magnetisasi dengan fluks sisa dapat dilihat melalui Gambar 3.11.

3.4 Eksperimen Pengukuran Arus Inrush

Eksperimen pengukuran arus inrush dalam studi ini menggunakan perlengkapan perangkat keras. Secara umum proses eksperimen pengukuran arus inrush terdiri dari tahap pengukuran dan tahap demagnetisasi. Tahap pengukuran dilakukan untuk memperoleh nilai dan bentuk arus inrush. Tahap demagnetisasi dilakukan setelah tahap pengukuran. Sesuai dengan persamaan 2.9 nilai arus inrush dipengaruhi oleh keberadaan fluks sisa pada transformator. Sehingga untuk memperoleh nilai arus inrush yang sesuai dengan kondisi awal transformator saat pertama kali dienergisasi maka proses demagnetisasi diperlukan. Metode demagnetisasi yang dilakukan dalam studi ini terdiri dari metode pentanahan menggunakan kapasitor dan demagnetisasi suplai DC dengan tegangan variatif-frekuensi konstan. Pengukuran lanjut dilakukan setelah demagnetisasi selesai untuk mengetahui pengaruh demagnetisasi terhadap arus inrush.

3.4.1 Perancangan Alat Pengukuran Arus Inrush

Perancangan alat untuk pengukuran arus inrush menggunakan rangkaian sebagaimana diagram 1 garis yang ditunjukkan seperti pada Gambar 3.12. Berdasarkan rangkaian pengukuran seperti pada Gambar 3.12, tampak bahwa perangkat keras yang digunakan terdiri dari objek transformator tiga fasa, switch tiga fasa, *Current Transformer* (CT), sumber AC tiga fasa, PXIe-1073, dan *current probe*. Peralatan pengukuran ini dilengkapi pula dengan perangkat lunak software LabVIEW dan DIAdem sebagai *human interface* untuk proses akuisisi data.



Gambar 3.12 Diagram 1 garis pengukuran arus inrush



Gambar 3.13 Kelengkapan pengukuran arus inrush

3.4.1.1 Sumber AC Tiga Fasa

Sumber daya yang digunakan pada pengukuran ini adalah sumber daya AC tiga fasa 380 Volt (*line-line*), pada frekuensi 50 Hz. Sumber daya yang digunakan pada pengukuran ini memiliki kapasitas arus yang besar untuk dapat memperoleh nilai arus inrush yang tinggi. Spesifikasi sumber AC tiga fasa ditunjukkan dalam Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Spesifikasi sumber daya tiga fasa

V(L-L)/V(L-N)	220/380 Volt
Kapasitas Arus	5 kA

3.4.1.2 Switch Tiga Fasa

Switch daya yang digunakan pada pengukuran ini adalah switch daya AC tiga fasa. Switch ini merupakan switch primer atau switch utama yang terhubung langsung dengan sumber 3 fasa. Switch digunakan untuk menghubungkan atau memutus rangkaian dengan sumber daya yang berkapasitas besar.

3.4.1.3 Current Transformer (CT)

Current transformer (CT) atau Transformator Arus adalah peralatan transformator yang digunakan untuk pengukuran arus yang besarnya hingga ratusan ampere. CT yang digunakan pada pengukuran ini merupakan CT dengan inti tunggal karena hanya diperlukan untuk mengukur arus saja. Kumparan primer CT dihubungkan seri dengan sisi primer transformator objek pengukuran yang terhubung dengan sumber daya tiga fasa. Sedangkan kumparan sekunder CT dihubungkan dengan *current probe*. Perangkat CT ini diperlukan untuk menyelamatkan *current probe* pada nilai maksimum arus yang melebihi 100 A. CT mengubah nilai arus yang melalui saluran daya menjadi lebih kecil sehingga *current probe* dapat melakukan pengukuran dengan aman sesuai kapasitasnya. Tabel 3.7 menunjukkan spesifikasi CT yang digunakan.

Tabel 3.7 Spesifikasi current Transformer

Merk	CIC
ratio	200/5

3.4.1.4 PXI, Software LabVIEW, dan DIAdem

Peralatan yang digunakan untuk memproses akuisisi data hasil pengukuran yaitu PXIe-1073 dari National Instrument. Peralatan ini memiliki frekuensi sampling hingga 1 MS/s. PXIe-1073 ini digunakan untuk mendapatkan gambaran bentuk gelombang arus inrush pada kondisi transien. Peralatan PXIe terhubung dengan perangkat lunak LabVIEW. LabVIEW ini digunakan sebagai *human interface* PXIe dan kontrol rangkaian demagnetisasi. Sehingga kendali rangkaian pengukuran dan demagnetisasi dapat terintegrasi pada satu komputer. Hasil akuisisi data dari LabVIEW kemudian ditampilkan dan diolah menggunakan software DIAdem untuk mendapatkan besar arus inrush dan durasi terjadinya arus inrush.

3.4.1.5 Current Probe

Untuk mengukur nilai arus inrush yang diamati *Current probe* digunakan dengan tersambung pada CT pada saluran fasa. *Current probe* ini juga dihubungkan dengan PXI. Arus yang telah ditransformasi oleh CT dibaca oleh *Current probe*. Arus yang terukur diubah oleh *Current probe* menjadi besaran tegangan (voltage), sehingga dapat diakuisisi oleh PXIe menjadi data. Spesifikasi dari current probe ditunjukkan dalam Tabel 3.8.

Tabel 3.8 Spesifikasi current probe

Merk	Tektronix
Jenis	A622
Frequency Range	DC to 100 kHz
Max Input Current	100 A peak
Output	10 mV/A, 100 mV/A
Max Conductor Diameter	11.8 mm (0.46 in.)
Termination	BNC*1
Max Bare-wire Voltage	600 V (CAT III)
Safety	UL3111-2-032 CSA1010.2.032 EN61010-2-032 IEC61010-2-032

3.4.2 Perancangan Peralatan Demagnetisasi

3.4.2.1 Demagnetisasi dengan Shunt Capacitor

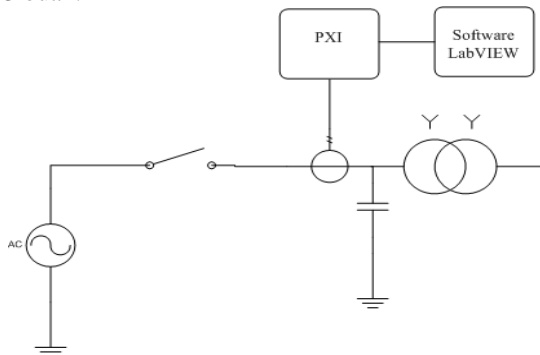
Kapasitor yang dihubungkan secara paralel terhadap rangkaian memiliki pengaruh dalam mengurangi magnet sisa yang terdapat di dalam transformator. Metode ini merujuk pada [17] yang telah memverifikasi pengaruh *shunt capacitor* terhadap fluks sisa. Energi kapasitif yang dimiliki kapasitor saat transien de-energisasi dapat mengurangi energi induktif yang terdapat dalam transformator. Hubungan pengaruh besar kapasitansi terhadap keberadaan fluks sisa dijelaskan melalui persamaan berikut.

$$\max \lambda o \propto -\log(C) \quad (3.5)$$

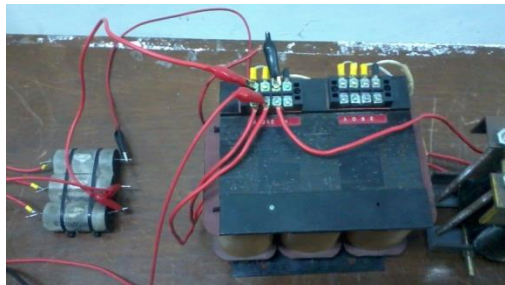
Jika sebuah *shunt capacitor* bernilai besar terhubung dengan transformator selama proses de-energisasi, semakin lama waktu yang

dibutuhkan untuk mencapai akhir transien. Waktu transien yang semakin lama akan menghasilkan fluks sisa yang lebih kecil. Studi rujukan ini menjadi solusi dalam mengurangi keberadaan fluks sisa dengan memberi tambahan *shunt capacitor* pada pentanahan transformator saat proses de-energisasi. Gambar 3.14 merupakan diagram rangkaian demagnetisasi dengan shunt capacitor. Sedangkan gambar 3.20 menunjukkan penampakan demagnetisasi dengan shunt capacitor.

Pelaksanaan metode ini menggunakan 2 variabel waktu terhubungnya kapasitor. Adapun variabel dalam metode demagnetisasi dengan *shunt capacitor* yakni menghubungkan kapasitor yang ditanahkan bersamaan dengan beroperasinya transformator tanpa beban; dan menghubungkan kapasitor yang ditanahkan setelah operasi transformator tanpa beban selesai (de-energisasi). Kapasitor yang digunakan dalam eksperimen ini memiliki kapasitas $400\ \mu\text{F}$ 250 Volt berjumlah 3 buah.



Gambar 3.14 Rangkaian demagnetisasi dengan shunt capacitor



Gambar 3.15 Demagnetisasi dengan shunt capacitor

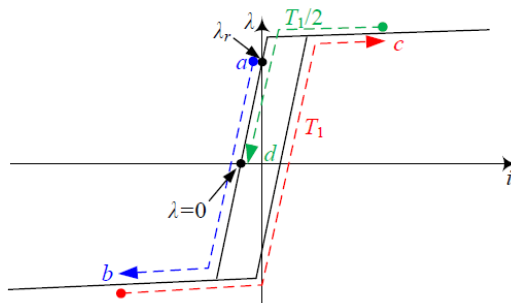
3.4.2.2 Demagnetisasi dengan Tegangan DC Variatif-Frekuensi Konstan

Sesuai dengan Hukum Faraday, saat tegangan DC dihubungkan ke induktor, arus $i(t)$ meningkat secara linier selama tegangan DC itu terhubung. Saat arus yang mengalir mencapai nilai maksimum, maka polaritas tegangan DC dibalik hingga arus bernilai $-I_{max}$. Jika pola ini dilakukan terus menerus dengan variasi nilai tegangan, maka fluks sisa yang terdapat dalam induktor akan terpengaruh karena:

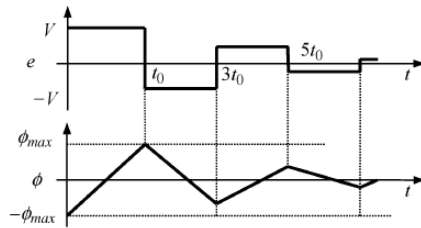
$$i(t) = \frac{1}{L} \int v(t) dt = \frac{V}{L} t \quad (3.6)$$

$$\Phi = L \cdot i(t) \quad (3.7)$$

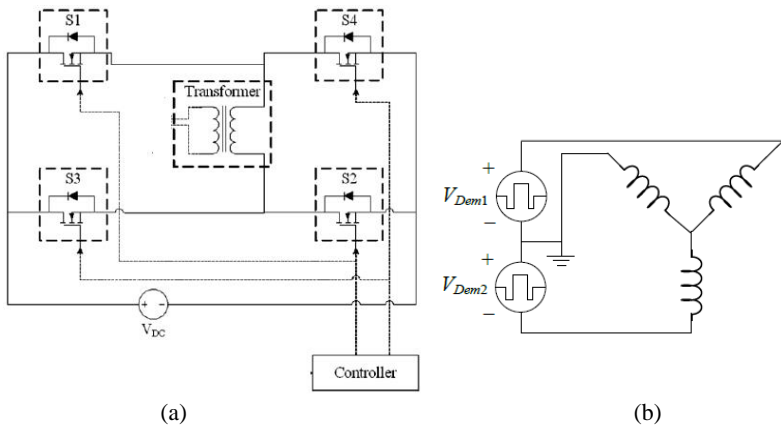
Dengan memberi variasi pengurangan nilai tegangan DC secara berturut-turut setiap setengah cycle, maka fluks yang terdapat di dalam induktor akan secara perlahan berkurang setiap setengah cycle. Untuk memulai proses tegangan DC disuplai ke transformator hingga mencapai tegangan saturasinya, 380 V_{LL} atau 220 V_{phase}, kemudian tegangan dibalik dan dikurangi secara perlahan. Frekuensi yang digunakan pada rangkaian ini adalah 0.1 Hz. Gambar 3.16 hingga gambar 3.17 menunjukkan konsep demagnetisasi DC variatif-frekuensi konstan. Sedangkan gambar 3.18 hingga gambar 3.19 menjelaskan rangkaian demagnetisasi DC variatif-frekuensi konstan [16]. Pada sistem 3 fasa rangkaian demagnetisasi yang diperlukan berjumlah 2 set. Keperluan ini dikarenakan kompleksitas rangkaian magnet dan rangkaian listrik transformator tiga fasa.



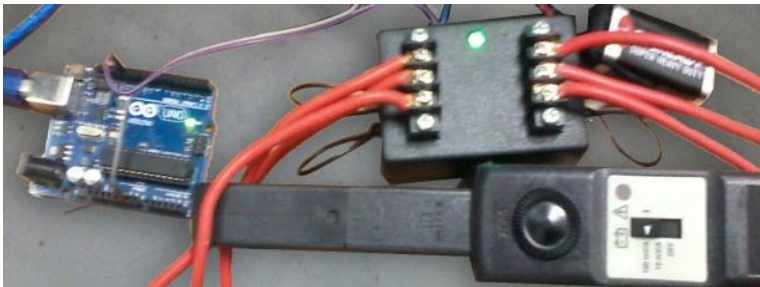
Gambar 3.16 Kurva magnetisasi saat demagnetisasi [18]



Gambar 3.17 Bentuk gelombang DC variatif - frekuensi konstan [17]



Gambar 3.18 Rangkaian demagnetisasi [18]; komponen yang diperlukan (a), hubungan rangkaian demagnetisasi dengan transformator (b)



Gambar 3.19 Bentuk fisik rangkaian demagnetisasi 3 fasa disertai kontrol arduino

Suplai DC diperoleh dari sumber tiga fasa 380 Volt (L-L) yang disearahkan dengan rectifier 25 A. Sumber AC tiga fasa ini dapat diatur nilai tegangannya mulai dari 0-380 sehingga dapat mengubah nilai tegangan secara teratur. Spesifikasi dari sumber AC tiga fasa ditunjukkan dalam Tabel 3.9 berikut:

Tabel 3.9 Spesifikasi sumber AC tiga fasa variabel

Merk	Leybold Didactic
V(L-L)/V(L-N)	220/380 Volt
Arus	6.5 A

BAB 4

ANALISIS SIMULASI DAN EKSPERIMEN

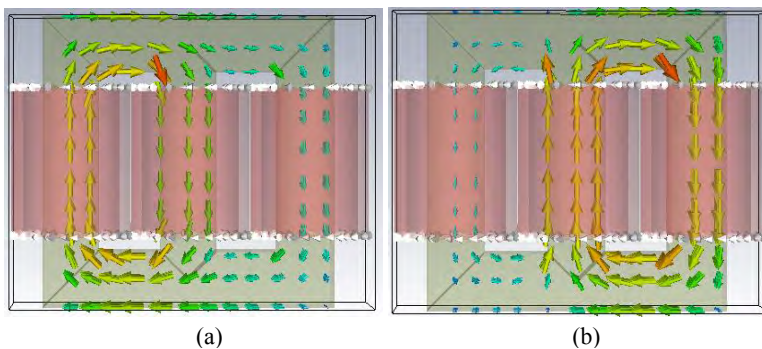
4.1 Distribusi Kerapatan Medan Magnet (B) dan Intensitas Medan Magnet (H)

Untuk mengetahui distribusi kerapatan medan magnet (B) dan Intensitas medan magnet (H) pada transformator, simulasi berbasis *finite-element method* dilakukan pada model transformator. Material yang digunakan sebagai inti adalah material St-37. Material St-37 adalah material inti yang sangat sering dijumpai di pasaran dan digunakan untuk transformator. Material ini termasuk baja lunak karena memiliki unsur silicon. St-37 memiliki nilai massa jenis sebesar 7850 kg/m³. Simulasi ini juga dapat menghasilkan nilai B dan H, sehingga dapat digunakan untuk memperoleh kurva magnetisasi. Nilai B pada kurva magnetisasi berguna untuk mengetahui besarnya gaya gerak magnet (mmf) yang melalui inti transformator.

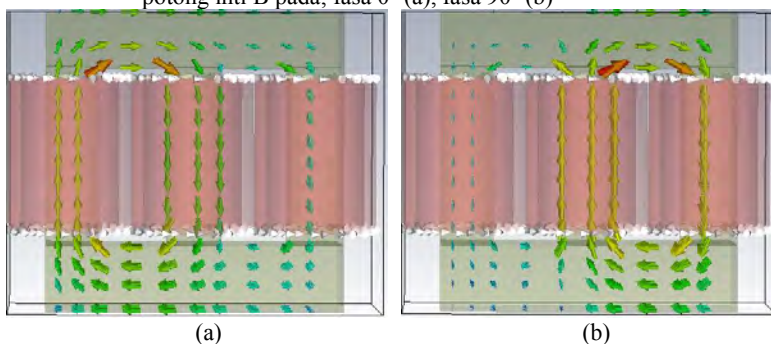
4.1.1 Distribusi Kerapatan Medan Magnet (B)

Dapat dilihat pada gambar 4.1, Pada sudut fasa 0° distribusi kerapatan medan magnet transformator dengan cara potong inti B dengan nilai terbesar berjalan dari bagian leg kiri menuju ke yoke atas, kemudian menuju ke center. Sedangkan pada fasa 90° distribusi kerapatan medan magnet dengan nilai terbesar mengalir dari bagian center menuju ke bagian yoke atas, kemudian mengalir menuju ke bagian leg kanan. Kerapatan medan magnet transformator dengan cara potong inti A menunjukkan arah aliran utama yang serupa dengan transformator dengan cara potong inti B, namun distribusi medan yang berbeda. Tampak pada gambar 4.2 kerapatan medan magnet terdistribusi lebih banyak di bagian yoke bawah.

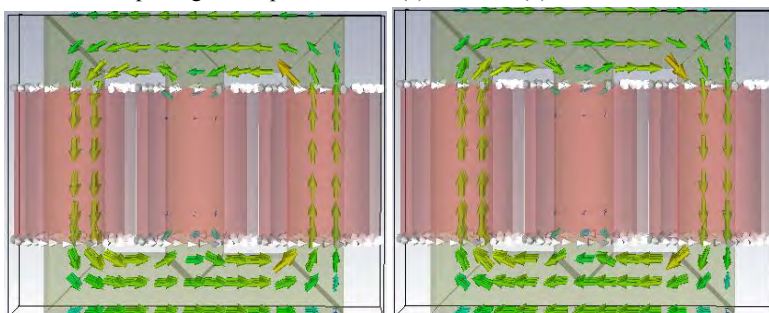
Fenomena berbeda tampak pada gambar 4.3. Distribusi kerapatan medan magnet kedua transformator pada sudut fasa 200° terlihat rata dan sama besar, terutama pada bagian yoke atas dan yoke bawah. Kerapatan medan magnet sebagian besar mengalir dari leg kanan menuju yoke atas, kemudian berjalan ke leg kiri hingga ke yoke bawah. Sedangkan pada sudut fasa 30° distribusi kerapatan medan magnet berjalan dari leg kiri menuju yoke atas, kemudian berjalan ke leg kanan hingga ke yoke bawah.



Gambar 4.1 Distribusi kerapatan medan magnet transformator dengan cara potong inti B pada; fasa 0° (a), fasa 90° (b)



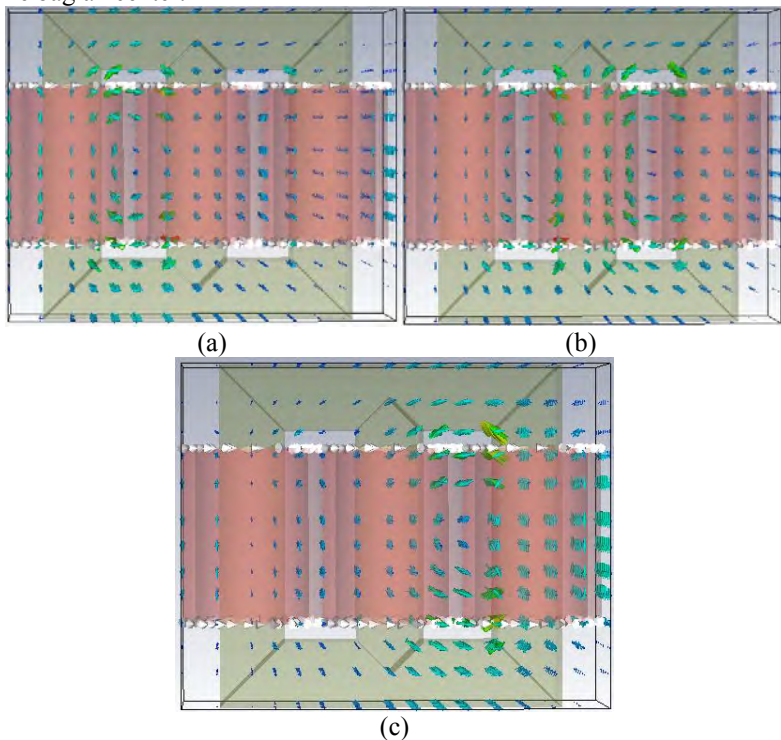
Gambar 4.2 Distribusi kerapatan medan magnet transformator dengan cara potong inti A pada; fasa 0° (a), fasa 90° (b)



Gambar 4.3 Distribusi kerapatan medan magnet pada; fasa 200° (a), fasa 30° (b)

4.1.2 Distribusi Intensitas Medan Magnet (H)

Distribusi intensitas medan magnet dengan nilai terbesar pada sudut fasa 0° , mengalir dari bagian leg kiri menuju ke bagian yoke bagian bawah. Kemudian mengalir menuju ke yoke atas melalui center. Distribusi intensitas medan magnet Pada Fasa 120° dengan nilai terbesar mengalir dari bagian yoke bawah menuju center, kemudian bergerak menuju ke leg kiri dan leg kanan melalui center. Sedangkan distribusi intensitas medan magnet pada fasa 240° dengan nilai terbesar mengalir dari bagian leg kanan menuju ke bagian yoke atas, lalu bergerak menuju ke bagian center.



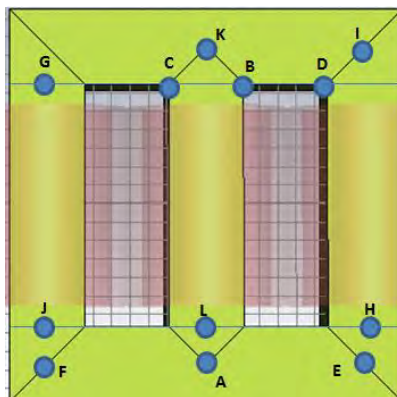
Gambar 4.4 Distribusi intensitas medan magnet pada; fasa 0° (a), fasa 120° (b), dan fasa 240°

4.2 Perbandingan Kurva Magnetisasi Antarbentuk Potongan Inti Transformator

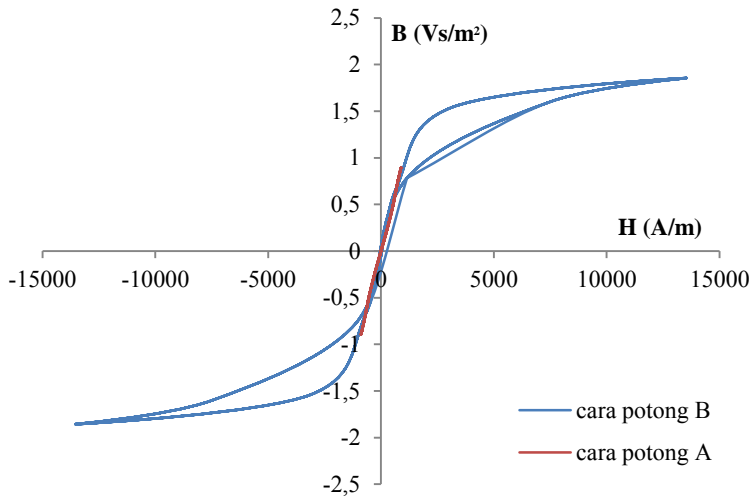
Karena bentuk transformator yang bersifat kontinu, maka pengamatan nilai B dan H dilakukan pada titik-titik monitor tertentu. Titik-titik monitor ini diterapkan di kedua transformator. Pertimbangan peletakan titik-titik monitor ini yaitu untuk mengamati kurva magnetisasi yang terjadi pada titik-titik sambungan potongan inti transformator. Maka titik-titik monitor yang diamati tersusun pada tabel 4.1 dan gambar 4.5

Tabel 4.1 Daftar titik monitor kurva B-H

Titik Monitor	Koordinat sumbu x	Koordinat sumbu y	Koordinat sumbu z
A	-2.02781746	6.3	2.47218254
B	-0.027817459305	-8.7	2.472182540695
C	1.972182540695	6.3	-2.527817459305
D	-8.4263888622875	6.0711827323499	4.472182540695
E	6.472182540695	6.3	-2.527817459305
F	8.222182540695	-8.45	-2.527817459305
G	-8.277817459305	-8.45	2.472182540695
H	8.7825168826576	-6.1065064631345	-0.099999999999
I	8.472182540695	8.3	-0.027817459305
J	-8.3385012589267	-6.1065064631345	-0.099999999999
K	-0.027817459305	8.3	-0.027817459305
L	0.2220078118655	-6.1065064631345	-0.099999999999



Gambar 4.5 Titik monitor pengamatan inti transformator

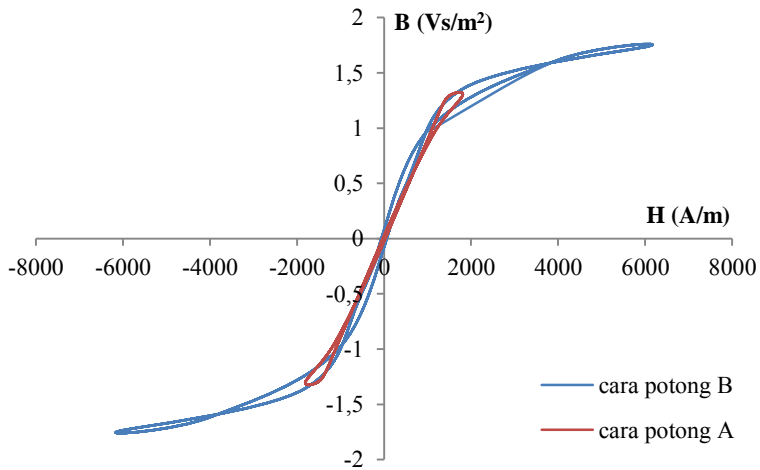


Gambar 4.6 Perbandingan kurva magnetisasi pada titik A

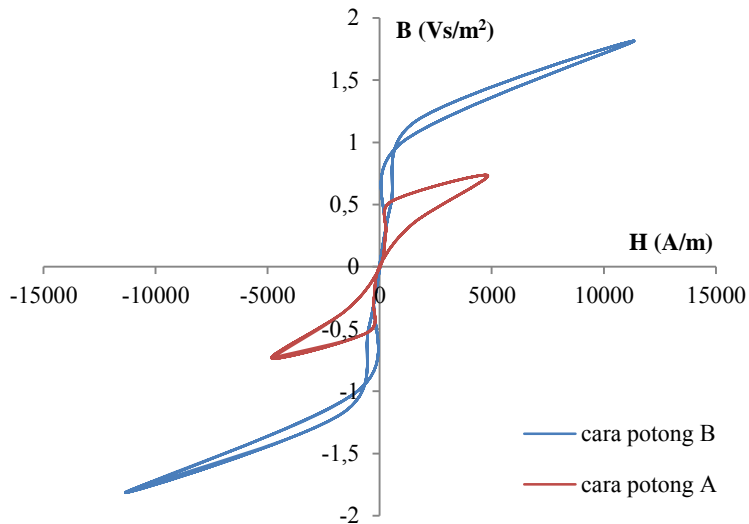
Kurva magnetisasi pada titik A, seperti pada gambar 4.6, menunjukkan inti transformator dengan cara potong A memiliki nilai $B_{\min} = -0.89505311 \text{ (Vs/m}^2\text{)}$; $B_{\max} = 0.89505311 \text{ (Vs/m}^2\text{)}$; $H_{\min} = -887.884 \text{ A/m}$; $H_{\max} = 887.884 \text{ A/m}$. Sedangkan pada inti transformator dengan cara potong B kurva magnetisasi diperoleh nilai $B_{\min} = -1.85469 \text{ (Vs/m}^2\text{)}$; $B_{\max} = 1.85469 \text{ (Vs/m}^2\text{)}$; $H_{\min} = -13433.6 \text{ A/m}$; $H_{\max} = 13433.6 \text{ A/m}$. Nilai B_{\max} pada inti transformator dengan cara potong B lebih besar dibandingkan inti transformator dengan cara potong A. Demikian pula yang terjadi dengan nilai H . Maka pada titik A inti transformator dengan cara potong B lebih baik dikarenakan fluks totalnya lebih banyak dan titik saturasinya lebih tinggi.

Kurva magnetisasi pada titik B, seperti pada gambar 4.7, menunjukkan inti transformator dengan cara potong A memiliki nilai $B_{\min} = -1.29828 \text{ (Vs/m}^2\text{)}$; $B_{\max} = 1.29828 \text{ (Vs/m}^2\text{)}$; $H_{\min} = -1807.36 \text{ A/m}$; $H_{\max} = 1807.36 \text{ A/m}$. Sedangkan pada inti transformator dengan cara potong B diperoleh nilai $B_{\min} = -1.74463 \text{ (Vs/m}^2\text{)}$; $B_{\max} = 1.74463 \text{ (Vs/m}^2\text{)}$; $H_{\min} = -6117.72 \text{ A/m}$; $H_{\max} = 6117.72 \text{ A/m}$. Nilai B_{\max} pada inti transformator dengan cara potong B lebih besar dibandingkan inti transformator dengan cara potong A. Demikian pula yang terjadi dengan nilai H . Maka pada titik B inti transformator dengan

cara potong B lebih baik disebabkan fluks totalnya lebih banyak dan titik saturasinya lebih tinggi.



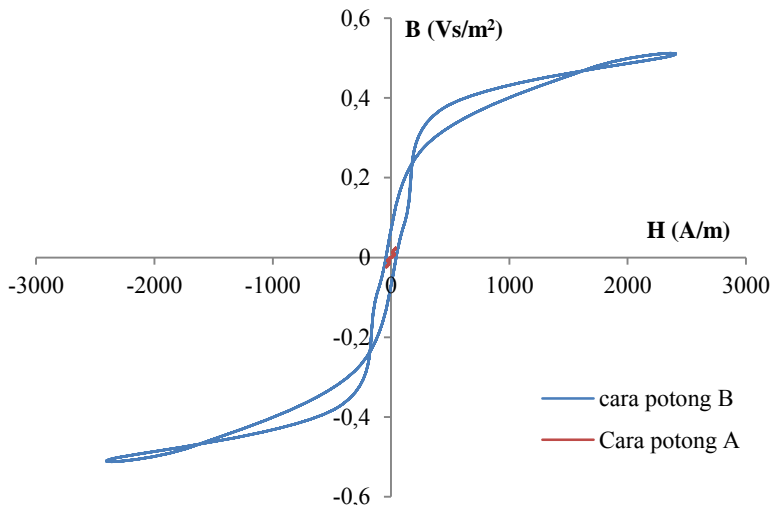
Gambar 4.7 Perbandingan kurva magnetisasi pada titik B



Gambar 4.8 Perbandingan kurva magnetisasi pada titik C

Kurva magnetisasi pada titik C, seperti pada gambar 4.8, menunjukkan inti transformator dengan cara potong A memiliki nilai $B_{min} = -0.733678 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $B_{max} = 0.733678 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $H_{min} = -4819.72 \text{ A/m}$; $H_{max} = 4819.72 \text{ A/m}$. Sedangkan pada inti transformator dengan cara potong B diperoleh nilai $B_{min} = -1.81349 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $B_{max} = 1.81349 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $H_{min} = -11350 \text{ A/m}$; $H_{max} = 11350 \text{ A/m}$. Nilai B_{max} pada inti transformator dengan cara potong B lebih besar dibandingkan inti transformator dengan cara potong A. Demikian pula yang terjadi dengan nilai H. Maka pada titik C inti transformator dengan cara potong B lebih baik disebabkan fluks totalnya lebih banyak dan titik saturasinya lebih tinggi.

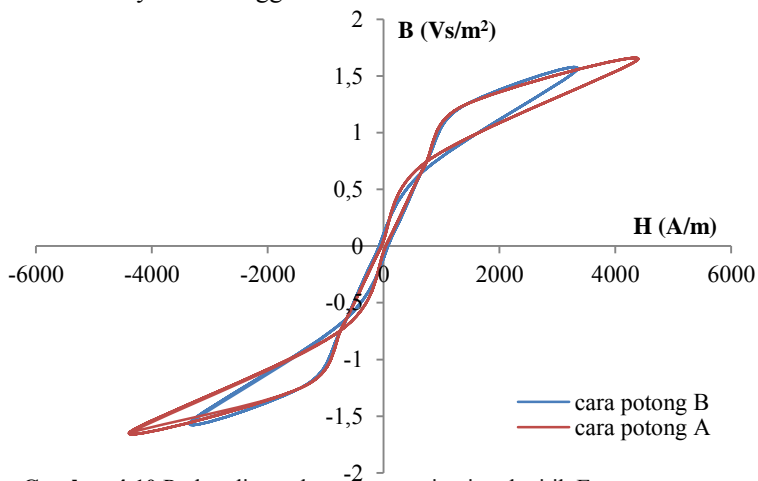
Kurva magnetisasi pada titik D, seperti pada gambar 4.9, menunjukkan inti transformator dengan cara potong A memiliki nilai $B_{min} = -0.02389 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $B_{max} = 0.02389 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $H_{min} = -38.7829 \text{ A/m}$; $H_{max} = 38.7829 \text{ A/m}$. Sedangkan pada inti transformator dengan cara potong B diperoleh nilai $B_{min} = -0.50553 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $B_{max} = 0.50553 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $H_{min} = -2366.49 \text{ A/m}$; $H_{max} = 2366.49 \text{ A/m}$. Nilai B_{max} pada inti transformator dengan cara potong B lebih besar dibandingkan inti transformator dengan cara potong A. Demikian pula yang terjadi dengan nilai H. Maka pada titik D inti transformator dengan cara potong B lebih baik disebabkan fluks totalnya lebih banyak dan titik saturasinya lebih tinggi.



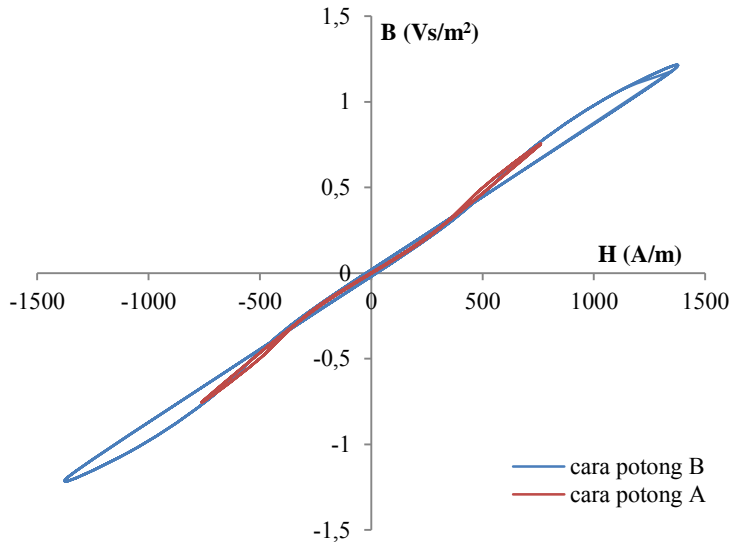
Gambar 4.9 Perbandingan kurva magnetisasi pada titik D

Kurva magnetisasi pada titik E, seperti pada gambar 4.10, menunjukkan inti transformator dengan cara potong A memiliki nilai $B_{min} = -1.64687 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $B_{max} = 1.64687 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $H_{min} = -4393.08 \text{ A/m}$; $H_{max} = 4393.08 \text{ A/m}$. Sedangkan pada inti transformator dengan cara potong B diperoleh nilai $B_{min} = -1.55844 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $B_{max} = 1.55844 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $H_{min} = -3343.61 \text{ A/m}$; $H_{max} = 3343.61 \text{ A/m}$. Nilai B_{max} pada inti transformator dengan cara potong A lebih besar dibandingkan inti transformator dengan cara potong B. Demikian pula yang terjadi dengan nilai H. Maka pada titik E inti transformator dengan cara potong A lebih baik disebabkan fluks totalnya lebih banyak dan titik saturasinya lebih tinggi.

Kurva magnetisasi pada titik F, seperti pada gambar 4.11, menunjukkan inti transformator dengan cara potong A memiliki nilai $B_{min} = -0.74375 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $B_{max} = 0.74375 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $H_{min} = -753.565 \text{ A/m}$; $H_{max} = 753.565 \text{ A/m}$. Sedangkan pada inti transformator dengan cara potong B diperoleh nilai $B_{min} = -1.17994 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $B_{max} = 1.17994 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $H_{min} = -1351.024 \text{ A/m}$; $H_{max} = 1351.024 \text{ A/m}$. Nilai B_{max} pada inti transformator dengan cara potong B lebih besar dibandingkan inti transformator dengan cara potong A. Demikian pula yang terjadi dengan nilai H. Maka pada titik F inti transformator dengan cara potong B lebih baik disebabkan fluks totalnya lebih banyak dan titik saturasinya lebih tinggi.



Gambar 4.10 Perbandingan kurva magnetisasi pada titik E

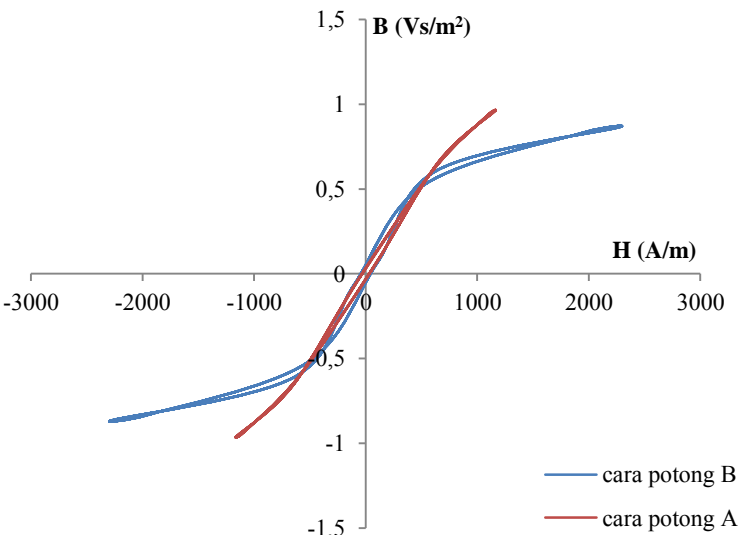


Gambar 4.11 Perbandingan kurva magnetisasi pada titik F

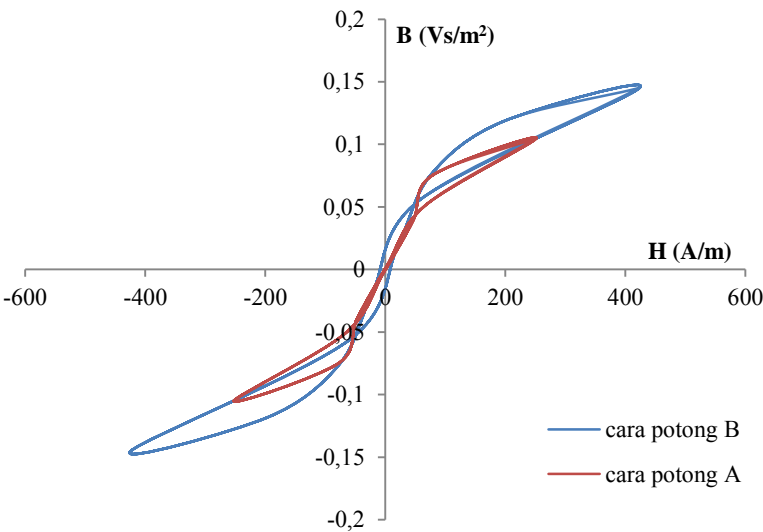
Kurva magnetisasi pada titik G, seperti pada gambar 4.12, menunjukkan inti transformator dengan cara potong A memiliki nilai $B_{min} = -0.96242 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $B_{max} = 0.96242 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $H_{min} = -1161.92 \text{ A/m}$; $H_{max} = 1161.92 \text{ A/m}$. Sedangkan pada inti transformator dengan cara potong B diperoleh nilai $B_{min} = -0.86446 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $B_{max} = 0.86446 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $H_{min} = -2271.81 \text{ A/m}$; $H_{max} = 2271.81 \text{ A/m}$. Nilai B_{max} pada inti transformator dengan cara potong A lebih besar dibandingkan inti transformator dengan cara potong B. Demikian pula yang terjadi dengan nilai H. Maka pada titik G inti transformator dengan cara potong A lebih baik disebabkan fluks totalnya lebih banyak dan titik saturasinya lebih tinggi.

Kurva magnetisasi pada titik H, seperti pada gambar 4.13, menunjukkan inti transformator dengan cara potong A memiliki nilai $B_{min} = -0.10511 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $B_{max} = 0.10511 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $H_{min} = -252.233 \text{ A/m}$; $H_{max} = 252.233 \text{ A/m}$. Sedangkan pada inti transformator dengan cara potong B diperoleh nilai $B_{min} = -0.14509 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $B_{max} = 0.14509 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $H_{min} = -423.901 \text{ A/m}$; $H_{max} = 423.901 \text{ A/m}$. Nilai B_{max} pada inti transformator dengan cara potong B lebih besar dibandingkan inti transformator dengan cara potong A. Demikian pula yang terjadi dengan nilai H. Maka pada titik H inti transformator dengan

cara potong B lebih baik disebabkan fluks totalnya lebih banyak dan titik saturasinya lebih tinggi.

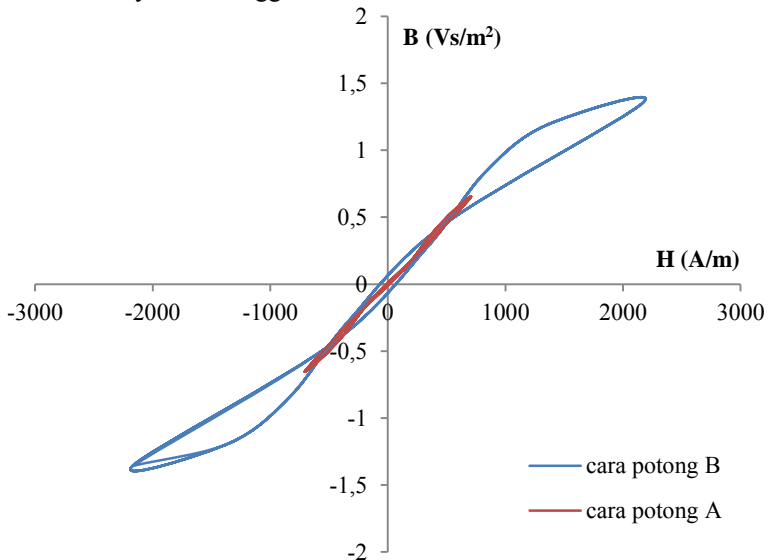


Gambar 4.12 Perbandingan kurva magnetisasi pada titik G



Gambar 4.13 Perbandingan kurva magnetisasi pada titik H

Kurva magnetisasi pada titik I, seperti pada gambar 4.14, menunjukkan inti transformator dengan cara potong A memiliki nilai $B_{min} = -0.63943 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $B_{max} = 0.63943 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $H_{min} = -695.564 \text{ A/m}$; $H_{max} = 695.564 \text{ A/m}$. Sedangkan pada inti transformator dengan cara potong B diperoleh nilai $B_{min} = -1.35774 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $B_{max} = 1.35774 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $H_{min} = -2172.31 \text{ A/m}$; $H_{max} = 2172.31 \text{ A/m}$. Nilai B_{max} pada inti transformator dengan cara potong B lebih besar dibandingkan inti transformator dengan cara potong A. Demikian pula yang terjadi dengan nilai H. Maka pada titik I inti transformator dengan cara potong B lebih baik disebabkan fluks totalnya lebih banyak dan titik saturasinya lebih tinggi.

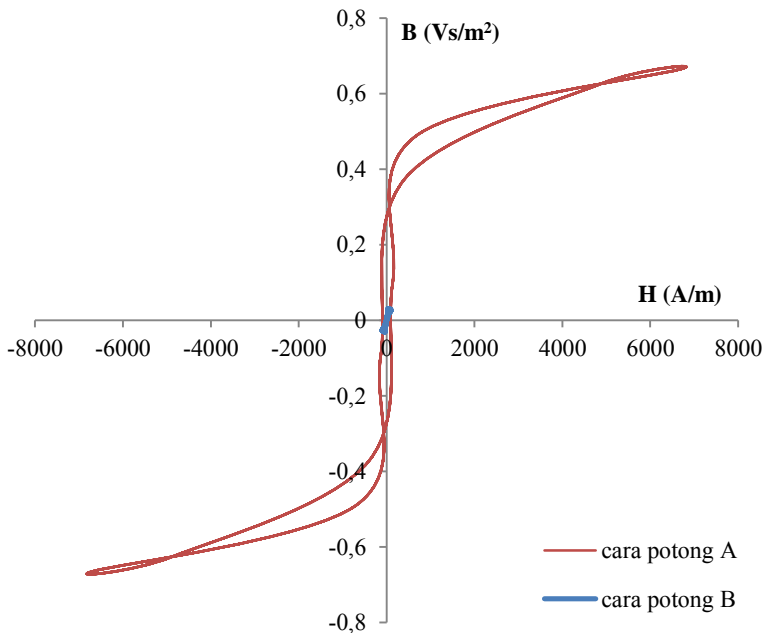


Gambar 4.14 Perbandingan kurva magnetisasi pada titik I

Kurva magnetisasi pada titik J, seperti pada gambar 4.15, menunjukkan inti transformator dengan cara potong A memiliki nilai $B_{min} = -0.66489 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $B_{max} = 0.66489 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $H_{min} = -6699.11 \text{ A/m}$; $H_{max} = 6699.11 \text{ A/m}$. Sedangkan pada inti transformator dengan cara potong B diperoleh nilai $B_{min} = -0.03097 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $B_{max} = 0.03097 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $H_{min} = -100.839 \text{ A/m}$; $H_{max} = 100.839 \text{ A/m}$. Nilai B_{max} pada inti transformator dengan cara potong A jauh lebih besar

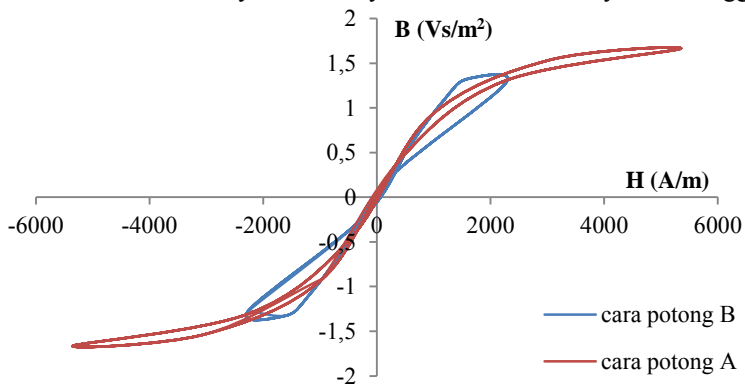
dibandingkan inti transformator dengan cara potong B. Nilai H_{max} pada inti transformator dengan cara potong A juga jauh lebih besar daripada inti transformator dengan cara potong B. Maka pada titik J inti transformator dengan cara potong A lebih baik disebabkan fluks totalnya lebih banyak dan titik saturasinya lebih tinggi.

Kurva magnetisasi pada titik K, seperti pada gambar 4.16, menunjukkan inti transformator dengan cara potong A memiliki nilai $B_{min} = -1.66321 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $B_{max} = 1.66321 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $H_{min} = -5347.6 \text{ A/m}$; $H_{max} = 5347.6 \text{ A/m}$. Sedangkan pada inti transformator dengan cara potong B diperoleh nilai $B_{min} = -1.32254 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $B_{max} = 1.32254 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $H_{min} = -2265.44 \text{ A/m}$; $H_{max} = 2265.44 \text{ A/m}$. Nilai B_{max} pada inti transformator dengan cara potong A lebih besar dibandingkan inti transformator dengan cara potong B. Demikian pula yang terjadi dengan nilai H . Maka pada titik K inti transformator dengan cara potong A lebih baik disebabkan fluks totalnya lebih banyak dan titik saturasinya lebih tinggi.

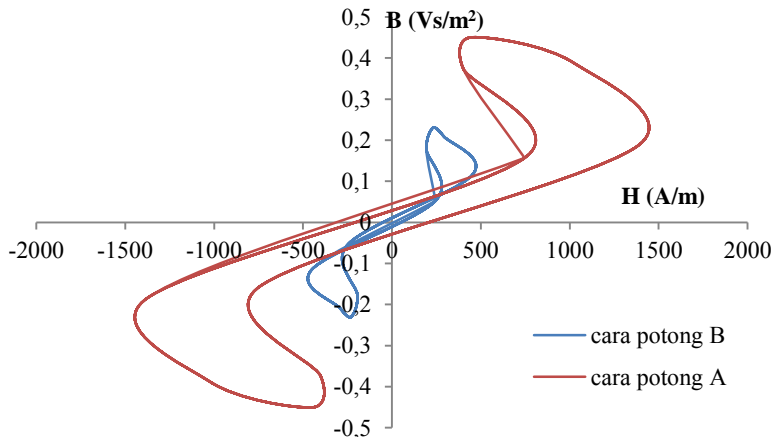


Gambar 4.15 Perbandingan kurva magnetisasi pada titik J

Kurva magnetisasi pada titik L, seperti pada gambar 4.17, menunjukkan inti transformator dengan cara potong A memiliki nilai $B_{min} = -0.45054 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $B_{max} = 0.45054 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $H_{min} = -1379.34 \text{ A/m}$; $H_{max} = 1379.34 \text{ A/m}$. Sedangkan pada inti transformator dengan cara potong B diperoleh nilai $B_{min} = -0.23074 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $B_{max} = 0.23074 \text{ (V.s/m}^2\text{)}$; $H_{min} = -451.66 \text{ A/m}$; $H_{max} = 451.66 \text{ A/m}$. Nilai B_{max} pada inti transformator dengan cara potong A lebih besar dibandingkan inti dengan cara potong B. Ini juga terjadi pada nilai H. Maka pada titik L inti transformator dengan cara potong A lebih baik disebabkan fluks totalnya lebih banyak dan titik saturasinya lebih tinggi.



Gambar 4.16 Perbandingan kurva magnetisasi pada titik K



Gambar 4.17 Perbandingan kurva magnetisasi pada titik L

Berdasarkan keseluruhan data kurva magnetisasi yang telah diuraikan di atas, pada inti transformator dengan cara potong A, nilai B dan H yang paling besar terdapat pada titik pengamatan K (-0.027817459305; 8.3; -0.027817459305). Sedangkan nilai B dan H yang paling kecil pada inti transformator dengan cara potong A terdapat pada titik D (-8.4263888622875; 6.0711827323499; 4.472182540695). Kemudian nilai B dan H yang paling besar pada inti transformator dengan cara potong B terdapat pada titik A (-2.02781746; 6.3; 2.47218254). Sedangkan nilai B dan H yang paling kecil pada inti transformator dengan cara potong B terdapat pada titik J (- 8.3385012589267; -6.1065064631345; -0.0999999999999).

Tabel 4.2 dan tabel 4.3 menunjukkan perbandingan kerapatan medan magnet maksimum dan intensitas medan magnet maksimum. Berdasarkan kedua tabel tersebut terdapat fenomena menarik. Pada titik-titik yang terletak pada sambungan antarpotongan inti nilai B dan H menunjukkan angka yang relatif lebih tinggi dibandingkan titik yang tidak terletak pada sambungan antarpotongan inti. Pada inti dengan cara potong B, nilai B dan H pada titik A, F, dan I menunjukkan nilai yang lebih tinggi dibandingkan inti dengan cara potong A. Demikian juga pada titik G, J, dan L nilai B dan H, untuk inti dengan cara potong A, menunjukkan nilai yang lebih tinggi daripada inti dengan cara potong B. Sebagai penentu, titik B, C, dan D yang berada pada sambungan antarpotongan untuk kedua cara potong menunjukkan fenomena berbeda. Pada titik B, C, dan D nilai B dan H dari inti dengan cara potong B menunjukkan nilai yang lebih besar dibandingkan inti dengan cara potong A.

Tabel 4.2 Perbandingan nilai kerapatan medan magnet maksimum

Titik monitor	Nilai kerapatan medan magnet maksimum (Vs/m^2)	
	Cara potong A	Cara potong B
A	0.89505311	1.854689467
B	1.298279302	1.744631571
C	0.733678361	1.813492198
D	0.023886761	0.505532615
E	1.646873892	1.558442573
F	0.743747092	1.179941983
G	0.962423258	0.864456119
H	0.105109613	0.145090947
I	0.639428183	1.357744277

Lanjutan tabel 4.2 Perbandingan nilai kerapatan medan magnet maksimum		
Titik monitor	Nilai kerapatan medan magnet maksimum (Vs/m^2)	
	Cara potong A	Cara potong B
J	0.664892251	0.030968433
K	1.663214618	1.32254227
L	0.450538411	0.230741026

Tabel 4.3 Perbandingan nilai intensitas medan magnet maksimum

Titik monitor	Nilai intensitas medan magnet maksimum (A/m)	
	Cara potong A	Cara potong B
A	887.8837825	13433.62374
B	1807.363926	6117.724382
C	4819.718055	11350.00303
D	38.7829479	2366.485078
E	4393.082092	3343.609127
F	753.5649236	1351.023979
G	1161.918357	2271.813744
H	423.9005136	252.2332915
I	695.5643327	2172.305591
J	6699.112214	100.839087
K	5347.597361	2265.435215
L	1379.335901	451.6602265

4.3 Pengaruh Cara Pemotongan Inti Transformator dengan Nilai Puncak Arus Inrush Hasil Simulasi

Nilai puncak arus inrush dapat diperoleh melalui parameter magnetisasi hasil simulasi inti transformator. Hubungan parameter magnetisasi dengan arus inrush dinyatakan pada persamaan (2.9). Parameter B_s diperoleh dari nilai maksimum B pada tiap titik pengamatan, sebagaimana tertera pada tabel 4.2. Parameter B_n didapatkan dari hasil simulasi inti transformator saat bekerja normal. Sedangkan B_r merupakan nilai B pada saat H bernilai nol (0). Impedansi yang digunakan dalam perhitungan ini berdasarkan hasil pengujian transformator tanpa beban, sebagaimana terdapat pada tabel 3.3 dan tabel 3.5. Sehingga terdapat 2 nilai impedansi yang digunakan, yakni nilai impedansi minimum dan nilai impedansi maksimum. Berikut ini

merupakan nilai parameter yang dibutuhkan dalam perhitungan nilai puncak arus inrush untuk transformator dengan cara potong A.

Tabel 4.4 Nilai parameter arus inrush untuk inti transformator cara potong A

Titik monitor	$\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}$	$\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}$	Bn (Vs/m ²)	Br (Vs/m ²)
	minimum (ohm)	maksimum (ohm)		
A	30,034.07	187,520.58	0.00375	0.0015
B	30,034.07	187,520.58	0.018	0.0024
C	30,034.07	187,520.58	0.018	0.0005
D	30,034.07	187,520.58	0.018	0.0005
E	30,034.07	187,520.58	0.00375	0.05
F	30,034.07	187,520.58	0.00375	0.0005
G	30,034.07	187,520.58	0.0108	0.03
H	30,034.07	187,520.58	0.00971	0.015
I	30,034.07	187,520.58	0.00375	0.01
J	30,034.07	187,520.58	0.00971	0.28
K	30,034.07	187,520.58	0.00375	0.075
L	30,034.07	187,520.58	0.00971	0.045

Sedangkan nilai parameter yang dibutuhkan dalam perhitungan nilai puncak arus inrush untuk transformator dengan cara potong B dijabarkan melalui tabel B .

Tabel 4.5 Nilai parameter arus inrush untuk inti transformator cara potong B

Titik monitor	$\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}$	$\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}$	Bn (Vs/m ²)	Br (Vs/m ²)
	minimum (ohm)	maksimum (ohm)		
A	2,144.05	3,334.08	0.00367	0.14
B	2,144.05	3,334.08	0.0101	0.0065
C	2,144.05	3,334.08	0.0101	0.0038
D	2,144.05	3,334.08	0.0101	0.0185
E	2,144.05	3,334.08	0.00637	0.045
F	2,144.05	3,334.08	0.00637	0.013

Lanjutan Tabel 4.5 Nilai parameter arus inrush untuk inti transformator cara potong B				
Titik monitor	$\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}$	$\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}$	Bn (Vs/m ²)	Br (Vs/m ²)
	minimum (ohm)	maksimum (ohm)		
G	2,144.05	3,334.08	0.0101	0.032
H	2,144.05	3,334.08	0.0101	0.0004
I	2,144.05	3,334.08	0.00637	0.02
J	2,144.05	3,334.08	0.00637	0.0016
K	2,144.05	3,334.08	0.00367	0.002
L	2,144.05	3,334.08	0.0101	0.0065

Berdasarkan tabel 4.2, tabel 4.3, tabel 4.4, dan tabel 4.5, maka nilai arus inrush dapat dikalkulasi dalam persamaan 2.9. Berikut ini merupakan hasil kalkulasi persamaan 2.9 untuk ini transformator dengan cara potong A.

Tabel 4.6 Nilai arus inrush untuk inti transformator cara potong A

Titik monitor	Vm (Volt)	Arus Inrush (A)	
		$\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}$ minimum	$\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}$ maksimum
A	537.4	5.934	0.9504
B	537.4	1.775	0.2843
C	537.4	0.995	0.1593
D	537.4	0.0068	0.001
E	537.4	10.308	1.651
F	537.4	4.9366	0.790
G	537.4	2.068	0.3312
H	537.4	0.169	0.027
I	537.4	4.113	0.66
J	537.4	0.2456	0.03933
K	537.4	10.083	1.615
L	537.4	0.905	0.145

Dari tabel 4.6 diperoleh arus inrush tertinggi untuk inti transformator dengan cara potong A dengan impedansi ($\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}$) minimum bernilai 10.308 Ampere pada titik E. Sedangkan rata-rata arus inrush yang diperoleh senilai 3.46 Ampere. Pada impedansi ($\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}$) maksimum arus inrush tertinggi untuk inti transformator dengan cara potong A bernilai 1.651 A pada titik yang sama. Sedangkan rata-rata arus inrush yang diperoleh senilai 0.554 A. Sehingga secara keseluruhan hasil kalkulasi simulasi arus inrush tertinggi untuk inti transformator dengan cara potong A ialah 10.308 Ampere.

Berdasarkan tabel 4.2, tabel 4.3, tabel 4.4, dan tabel 4.5, nilai arus inrush dapat dikalkulasi dalam persamaan 2.9. Berikut ini merupakan hasil kalkulasi persamaan 2.9 untuk inti transformator dengan cara potong B.

Tabel 4.7 Nilai arus inrush untuk inti transformator cara potong B

Titik monitor	Vm (Volt)	Arus Inrush (A)	
		$\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}$ minimum	$\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}$ maksimum
A	537.4	150.2129947	96.59752231
B	537.4	59.81162752	38.46308394
C	537.4	62.39515848	40.12447609
D	537.4	15.9274458	10.24246806
E	537.4	80.54183133	51.79406326
F	537.4	63.21679975	40.65284922
G	537.4	27.45955205	17.65842361
H	537.4	3.273149563	2.104865418
I	537.4	72.24024839	46.45556145
J	537.4	1.178784817	0.758041559
K	537.4	125.7214856	80.84775911
L	537.4	7.214127189	4.63919126

Dari tabel 4.7 diperoleh arus inrush tertinggi untuk inti transformator dengan cara potong B dengan impedansi ($\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}$) minimum bernilai 150.2129947 Ampere pada titik A. Sedangkan rata-rata arus inrush yang diperoleh senilai 55.766 Ampere. Pada impedansi ($\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}$) maksimum arus inrush tertinggi untuk inti transformator dengan cara potong B bernilai 96.59752231 Ampere pada titik yang sama. Sedangkan rata-rata arus inrush yang diperoleh senilai 36.86 Ampere. Sehingga secara keseluruhan hasil kalkulasi simulasi arus inrush tertinggi untuk inti transformator dengan cara potong A ialah 150.2129947 Ampere.

Pengaruh cara potong terhadap arus inrush dapat dilihat pada tabel 4.8. Dari tabel tersebut arus inrush dengan cara potong B menunjukkan nilai yang lebih tinggi secara signifikan dibandingkan dengan cara potong A di segala titik. Faktor yang signifikan mempengaruhi perbedaan nilai arus inrush pada kedua cara potong ini ialah perbedaan nilai impedansi ($\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}$).

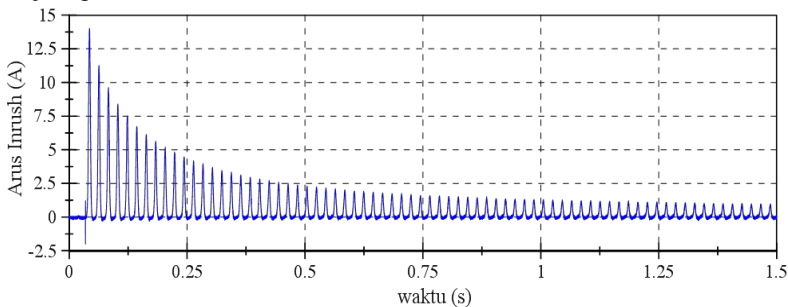
Tabel 4.8 Perbandingan arus inrush antara cara potong A dan cara potong B

Titik monitor	Vm (Volt)	Arus Inrush maksimum(A)	
		Cara potong A	Cara potong B
A	537.4	5.934	150.2129947
B	537.4	1.775	59.81162752
C	537.4	0.995	62.39515848
D	537.4	0.0068	15.9274458
E	537.4	10.308	80.54183133
F	537.4	4.9366	63.21679975
G	537.4	2.068	27.45955205
H	537.4	0.169	3.273149563
I	537.4	4.113	72.24024839
J	537.4	0.2456	1.178784817
K	537.4	10.083	125.7214856
L	537.4	0.905	7.214127189

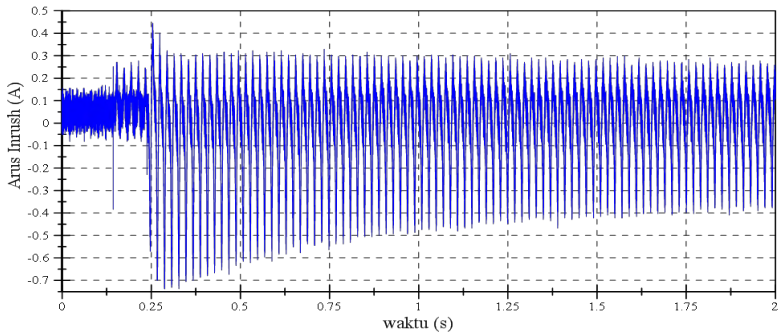
4.4 Pengaruh Cara Pemotongan Inti Transformator dengan Nilai Puncak Arus Inrush Hasil Eksperimen

Untuk mengetahui pengaruh cara pemotongan inti transformator dengan nilai puncak arus inrush melalui metode eksperimen, pengamatan pada titik-titik inti transformator sebagaimana kalkulasi hasil simulasi tidak dilakukan. Pengaruh cara pemotongan inti transformator diperoleh langsung melalui beberapa kali pengukuran arus inrush pada kedua transformator. Pengukuran arus inrush melalui metode eksperimen ini berusaha untuk mengurangi keberadaan fluks sisa.

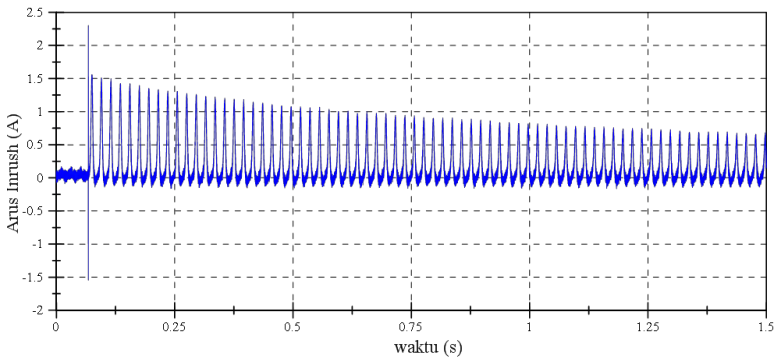
Pengukuran inrush kali pertama untuk transformator dengan cara potong A pada fasa R menunjukkan nilai arus inrush sama dengan 14 Ampere. Arus inrush terjadi selama 570 ms sejak transformator dihubungkan sumber daya. Arus inrush maksimum yang terukur pada fasa R terjadi pada *cycle* pertama. Bentuk gelombang arus inrush fasa R pengukuran pertama dapat dilihat pada gambar 4.18. Sedangkan pada fasa S nilai arus inrush menunjukkan angka 0.74 Ampere. Arus inrush terjadi selama 1200 ms sejak transformator dinyalakan. Arus inrush maksimum yang terukur pada fasa S terjadi pada *cycle* pertama. Bentuk gelombang arus inrush fasa S pengukuran pertama dapat dilihat pada gambar 4.19. Pada fasa T nilai arus inrush menunjukkan angka 1.5 Ampere. Arus inrush terjadi selama 480 ms sejak transformator dinyalakan. Arus inrush maksimum yang terukur pada fasa T terjadi pada *cycle* pertama. Bentuk gelombang arus inrush fasa T pengukuran pertama dapat dilihat pada gambar 4.20. Berdasarkan pengukuran ketiga fasa tersebut, nilai arus inrush tertinggi mencapai 14 Ampere pada fasa R yang berlangsung selama 570 ms. Sehingga total arus inrush yang terjadi pada transformator ini senilai 16.24 A



Gambar 4.18 Arus inrush pertama inti cara potong A fasa R



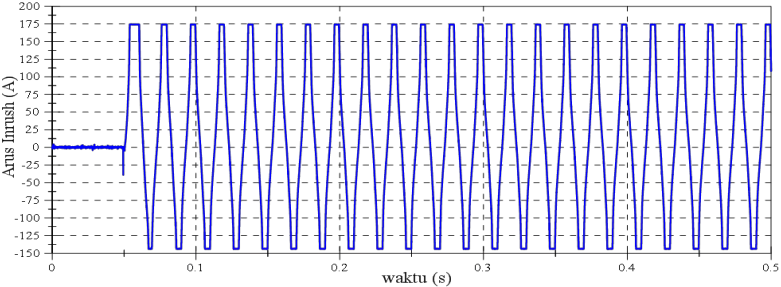
Gambar 4.19 Arus inrush pertama fasa S



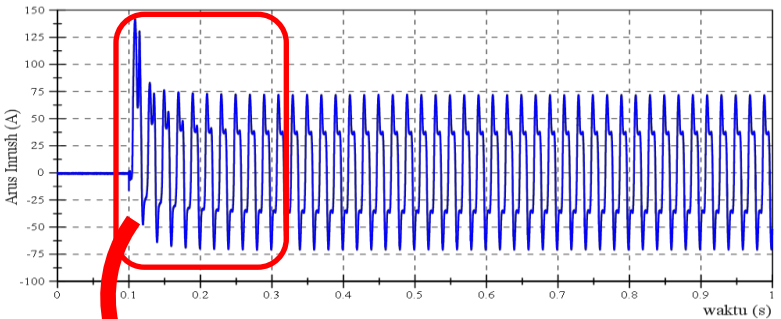
Gambar 4.20 Arus inrush pertama fasa T

Pengukuran inrush kali pertama untuk transformator dengan cara potong B pada fasa R menunjukkan nilai saturasi bahkan melebihi kapasitas pengukuran. Gelombang arus yang terekam peralatan ukur menunjukkan bentuk yang tidak linier. Arus yang tercatat pada fasa R melebihi 174 Ampere. Bentuk gelombang arus pada fasa R pengukuran pertama dapat dilihat pada gambar 4.21. Sedangkan pada fasa S nilai arus inrush menunjukkan angka yang lebih besar daripada 174 Ampere. Alat ukur tidak mampu merekam arus inrush pada transformator B untuk fasa S. Meskipun demikian arus inrush maksimum dapat dipastikan terjadi pada *cycle* pertama. Bentuk gelombang arus inrush fasa S pengukuran pertama dapat dilihat pada gambar 4.23. Pada fasa T nilai arus inrush menunjukkan angka 174 Ampere. Arus inrush terjadi selama 20 ms sejak transformator dinyalakan. Arus inrush maksimum yang terukur pada fasa T terjadi pada *cycle* pertama. Bentuk gelombang

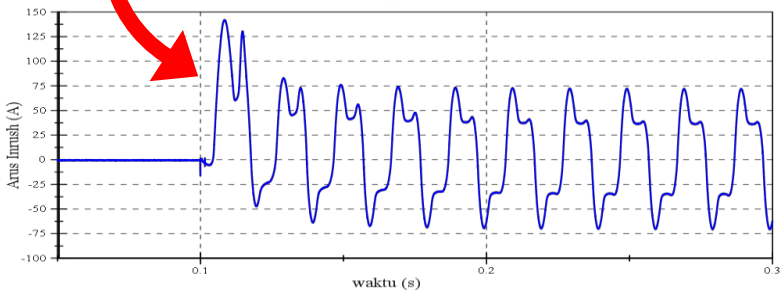
arus inrush fasa T pengukuran pertama dapat dilihat pada gambar 4.22. Berdasarkan pengukuran ketiga fasa tersebut, nilai arus inrush tertinggi mencapai lebih dari 150 Ampere pada fasa R maupun S. Yang menjadi catatan dalam pengukuran arus inrush transformator B ialah terdapat bunyi dengung selama sumber daya terhubung transformator .



Gambar 4.21 Arus inrush pertama inti cara potong B fasa R

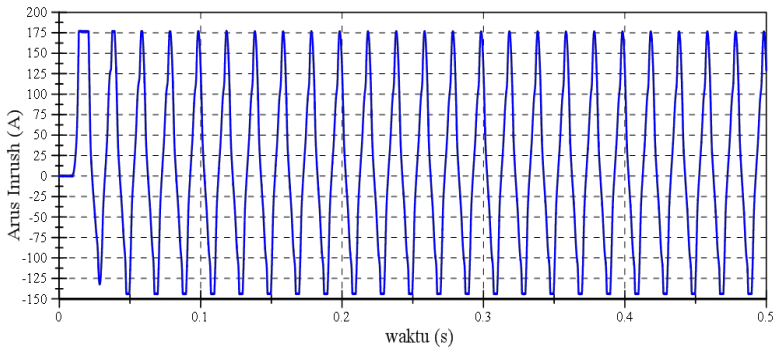


(a)



(b)

Gambar 4.22 Arus inrush pertama inti cara potong B fasa T; tanpa perbesaran (a); dan dengan perbesaran (b)

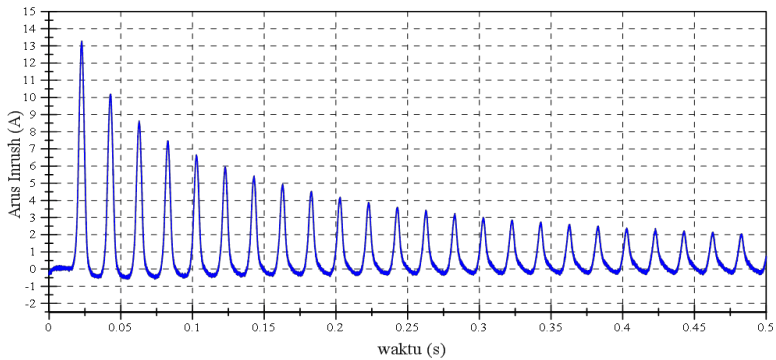


Gambar 4.23 Arus inrush pertama inti cara potong B fase S

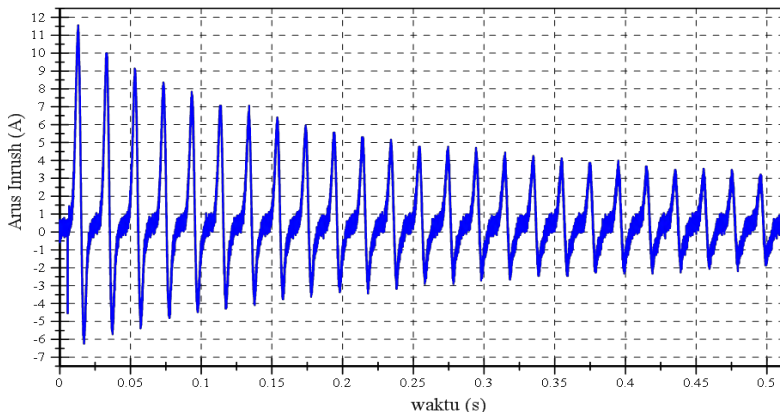
4.4.1 Pengaruh Demagnetisasi dengan Shunt Capacitor Terhadap Arus Inrush

Penggunaan metode demagnetisasi dengan shunt capacitor pada pengukuran arus inrush dibagi menjadi 2 variabel antara lain : shunt capacitor dihubungkan pada saat transformator terhubung sumber daya; dan shunt capacitor dihubungkan setelah transformator terlepas dari sumber daya. Bentuk gelombang arus inrush pada penggunaan shunt capacitor dihubungkan pada saat transformator terhubung sumber daya dengan penggunaan shunt capacitor dihubungkan setelah transformator terlepas dari sumber daya memiliki perbedaan.

Pada penggunaan shunt capacitor dihubungkan pada saat transformator terhubung sumber daya terjadi proses energisasi pada transformator dan shunt capacitor, sehingga arus inrush yang dihasilkan bisa berkurang. Bentuk gelombang dan besar nilai arus inrush sebelum didemagnetisasi dapat dilihat pada gambar 4.24. Sedangkan bentuk gelombang dan besar nilai arus inrush setelah penggunaan shunt capacitor dihubungkan pada saat transformator terhubung sumber daya dapat dilihat pada gambar 4.25. Tampak adanya pengurangan nilai arus inrush saat terhubung shunt capacitor yang telah dienergisasi dari 13.2 A menjadi 11.2 A.

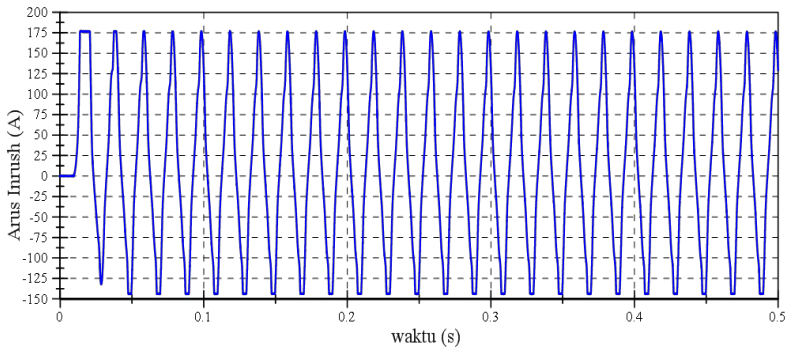


Gambar 4.24 Arus inrush inti potongan A sebelum didemagnetisasi

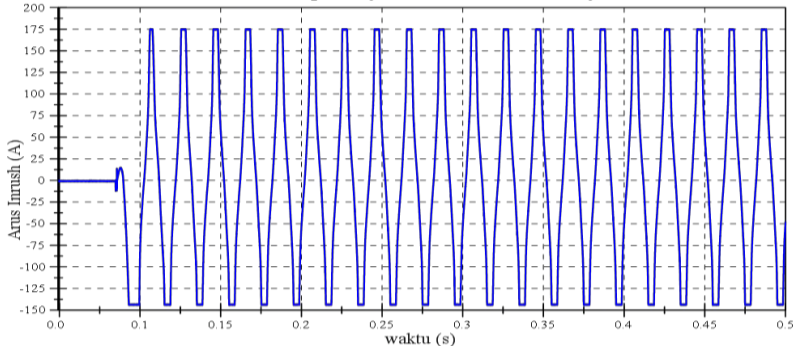


Gambar 4.25 Arus transformator dengan cara potong A saat terhubung shunt capacitor

Sedangkan pada transformator dengan inti menggunakan cara potong B respon akibat pengaruh shunt capacitor dihubungkan pada saat transformator terhubung sumber daya menunjukkan perubahan gelombang di cycle pertama. Jika pada gelombang pertama nilai puncak terpotong pada nilai 174 Ampere, maka dapat diasumsikan nilai puncak arus di cycle pertama bernilai lebih dari 174 Ampere. Setelah didemagnetisasi, nilai puncak gelombang mula berada pada nilai 174 Ampere, sebagaimana tampak pada gambar 4.26 hingga gambar 4.27.



Gambar 4.26 Arus inrush inti potongan B sebelum didemagnetisasi



Gambar 4.27 Arus transformator dengan cara potong B saat terhubung shunt capacitor

Tabel 4.9 Respon arus inrush terhadap demagnetisasi dengan shunt capacitor terhubung saat transformator beroperasi

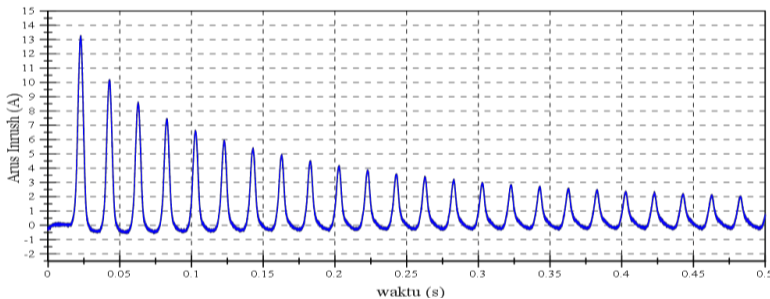
Pengaruh demagnetisasi	Arus inrush (A)	
	Inti Transformator dengan Cara potong A	Inti Transformator dengan Cara potong B
Sebelum demagnetisasi	13.2	>174
Sesudah demagnetisasi	11.2	174

Pada penggunaan shunt capacitor dihubungkan setelah transformator terlepas dari sumber daya, bentuk gelombang dan besar

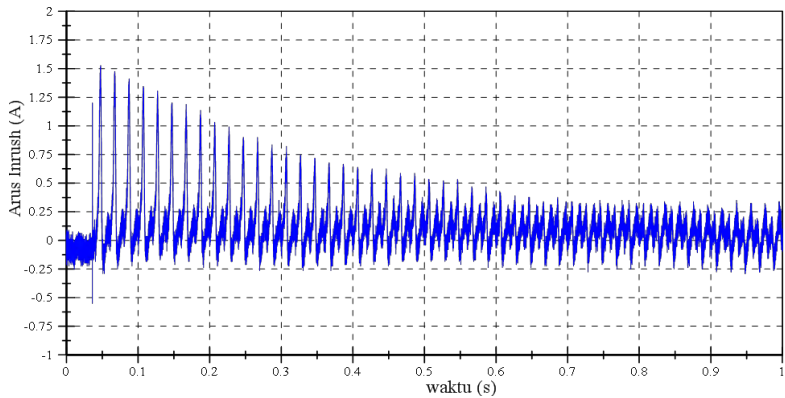
nilai arus inrush bervariasi. Namun bentuk gelombang arus inrush sebelum memiliki kesamaan bentuk dengan arus inrush sesudah didemagnetisasi. Pengukuran arus inrush dengan menggunakan metode ini dilakukan beberapa kali eksperimen.

Eksperimen demagnetisasi ini kali pertama dilakukan selama 24 jam sejak pengukuran pertama. Pengukuran hasil demagnetisasi pertama untuk transformator dengan cara potong A pada fasa R menunjukkan nilai arus inrush sama dengan 13 Ampere. Arus inrush terjadi selama 400 ms sejak transformator dihubungkan sumber daya. Arus inrush maksimum yang terukur pada fasa R terjadi pada *cycle* pertama. Bentuk gelombang arus inrush fasa R dapat dilihat pada gambar 4.28. Sedangkan pada fasa S nilai arus inrush menunjukkan angka 1.75 Ampere. Arus inrush terjadi selama 950 ms sejak transformator dinyalakan. Arus inrush maksimum yang terukur pada fasa S terjadi pada *cycle* pertama. Bentuk gelombang arus inrush fasa S dapat dilihat pada gambar 4.29. Pada fasa T nilai arus inrush menunjukkan angka 5 Ampere. Arus inrush terjadi selama 440 ms sejak transformator dinyalakan. Arus inrush maksimum yang terukur pada fasa T terjadi pada *cycle* pertama. Bentuk gelombang arus inrush fasa T dapat dilihat pada gambar 4.30. Sehingga total arus inrush maksimum yang terjadi senilai 19.75 Ampere.

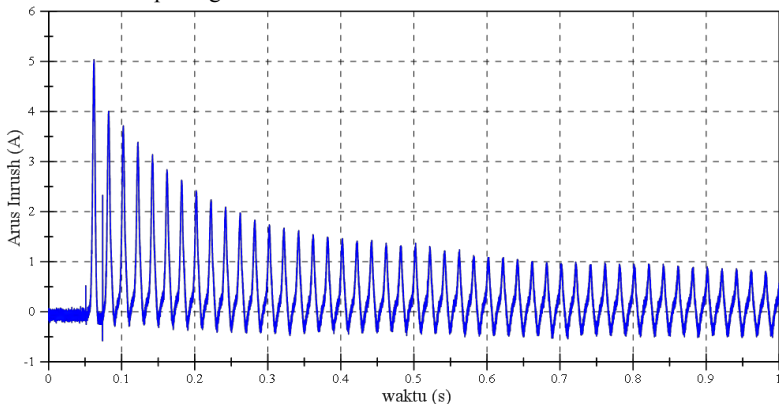
Berdasarkan pengukuran ketiga fasa tersebut, nilai arus inrush pada fasa R mengalami penurunan hingga 1 Ampere. Sedangkan nilai arus inrush pada fasa S mengalami kenaikan 0.74 Ampere dan fasa T mengalami kenaikan hingga 3.5 Ampere. Hasil demagnetisasi pertama ini menunjukkan keberhasilan metode pada fasa R namun tidak pada fasa S dan T. Dengan kenaikan nilai arus inrush ini dapat menunjukkan keberadaan fluks sisa.



Gambar 4.28 Arus inrush hasil demagnetisasi pertama fasa R pada inti cara potong A



Gambar 4.29 Arus inrush hasil demagnetisasi pertama fasa S pada inti cara potong A

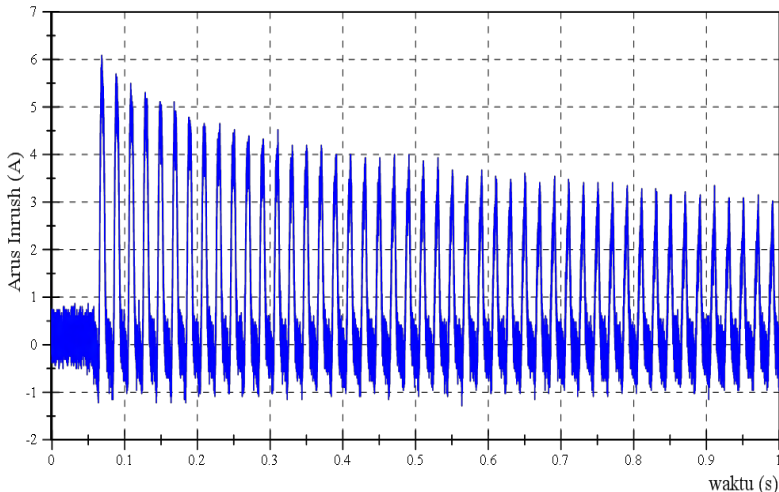


Gambar 4.30 Arus inrush hasil demagnetisasi pertama fasa T pada inti cara potong A

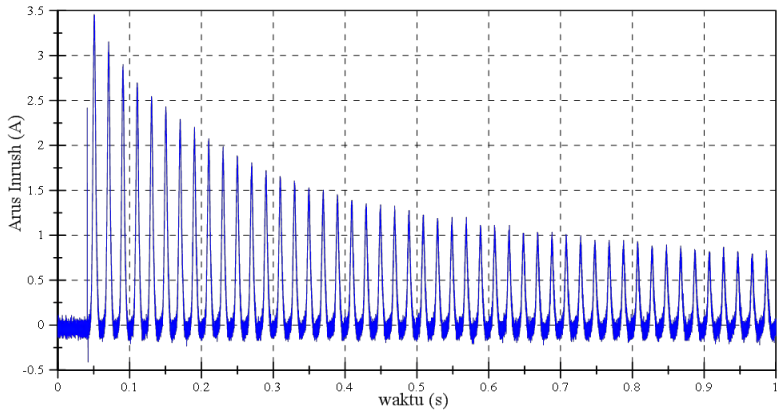
Eksperimen kedua dilakukan dengan melakukan demagnetisasi selama 3 hari setelah eksperimen pertama. Pengukuran hasil demagnetisasi kedua untuk transformator dengan cara potong A pada fasa R menunjukkan nilai arus inrush sama dengan 6 Ampere. Arus inrush terjadi selama 850 ms sejak transformator dihubungkan sumber daya. Arus inrush maksimum yang terukur pada fasa R terjadi pada *cycle* pertama. Bentuk gelombang arus inrush fasa R dapat dilihat pada gambar 4.31. Sedangkan pada fasa S nilai arus inrush menunjukkan angka 3.45 Ampere. Arus inrush terjadi selama 700 ms sejak

transformator dinyalakan. Arus inrush maksimum yang terukur pada fasa S terjadi pada *cycle* pertama. Bentuk gelombang arus inrush fasa S dapat dilihat pada gambar 4.32. Pada fasa T nilai arus inrush menunjukkan angka 7.1 Ampere. Arus inrush terjadi selama 675 ms sejak transformator dinyalakan. Arus inrush maksimum yang terukur pada fasa T terjadi pada *cycle* pertama. Bentuk gelombang arus inrush fasa T dapat dilihat pada gambar 4.33. Sehingga total arus inrush yang terjadi pada transformator ini senilai 16.2 Ampere.

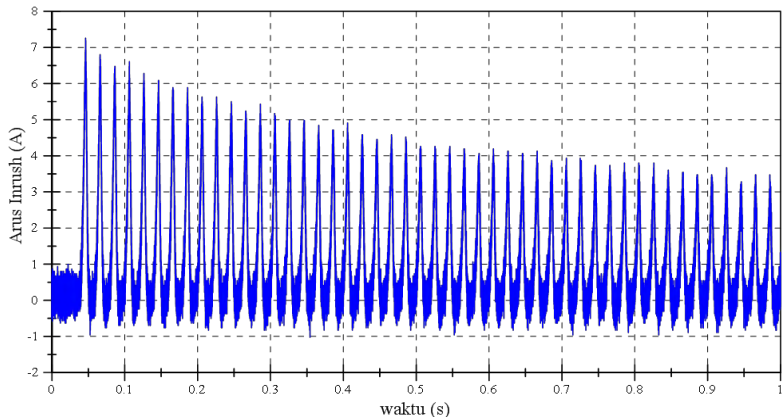
Berdasarkan pengukuran ketiga fasa tersebut, nilai arus inrush pada fasa R mengalami penurunan hingga 7 Ampere. Sedangkan nilai arus inrush pada fasa S mengalami kenaikan 1.7 Ampere dan fasa T mengalami kenaikan hingga 2.1 Ampere. Hasil demagnetisasi kedua ini menunjukkan keberhasilan metode pada fasa R namun tidak pada fasa S dan T. Meskipun pada fasa S dan T menunjukkan terdapat pengaruh keberadaan fluks sisa pada nilai arus inrush, namun secara keseluruhan dari nilai total arus inrush, hasil demagnetisasi kedua ini mampu mengembalikan nilai arus inrush transformator ke kondisi pertama kali dilakukan pengukuran.



Gambar 4.31 Arus inrush hasil demagnetisasi kedua fasa R pada inti cara potong A



Gambar 4.32 Arus inrush hasil demagnetisasi kedua fasa S pada inti cara potong A

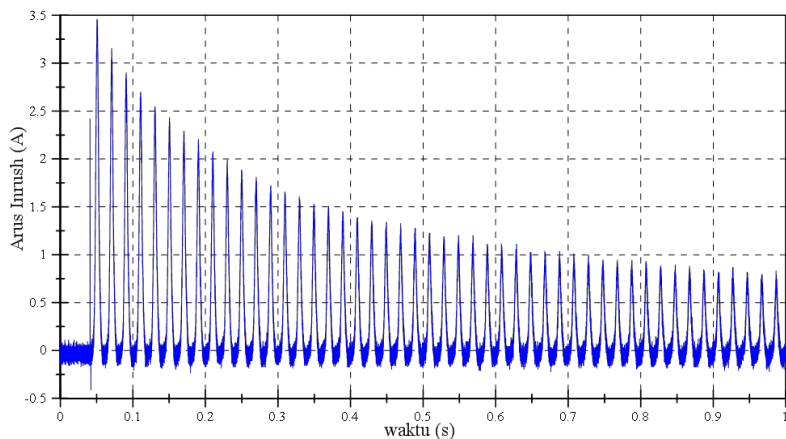


Gambar 4.33 Arus inrush hasil demagnetisasi kedua fasa T pada inti cara potong A

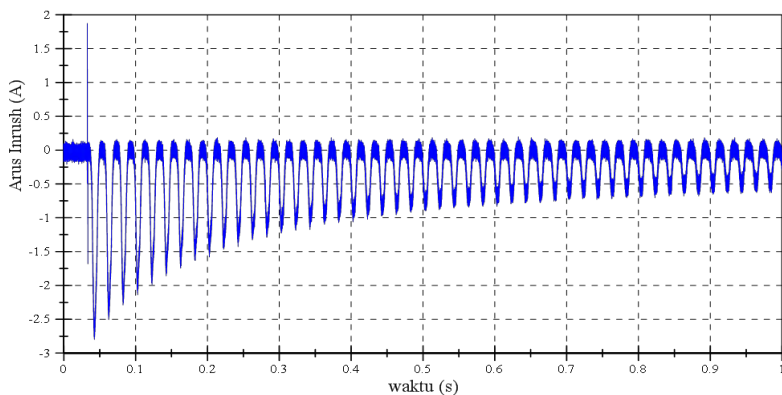
Eksperimen ketiga dilakukan dengan melakukan demagnetisasi selama 5 hari setelah eksperimen kedua. Pengukuran hasil demagnetisasi ketiga untuk transformator dengan cara potong A pada fasa R menunjukkan nilai arus inrush sama dengan 3.46 Ampere. Arus inrush terjadi selama 700 ms sejak transformator dihubungkan sumber daya. Arus inrush maksimum yang terukur pada fasa R terjadi pada *cycle* pertama. Bentuk gelombang arus inrush fasa R dapat dilihat pada

gambar 4.34. Sedangkan pada fasa S nilai arus inrush menunjukkan angka 2.72 Ampere. Arus inrush terjadi selama 550 ms sejak transformator dinyalakan. Arus inrush maksimum yang terukur pada fasa S terjadi pada *cycle* pertama. Bentuk gelombang arus inrush fasa S dapat dilihat pada gambar 4.35. Pada fasa T nilai arus inrush menunjukkan angka 4.11 Ampere. Arus inrush terjadi selama 570 ms sejak transformator dinyalakan. Arus inrush maksimum yang terukur pada fasa T terjadi pada *cycle* pertama. Bentuk gelombang arus inrush fasa T dapat dilihat pada gambar 4.36. Sehingga total arus inrush yang terjadi pada transformator ini senilai 10.29 Ampere.

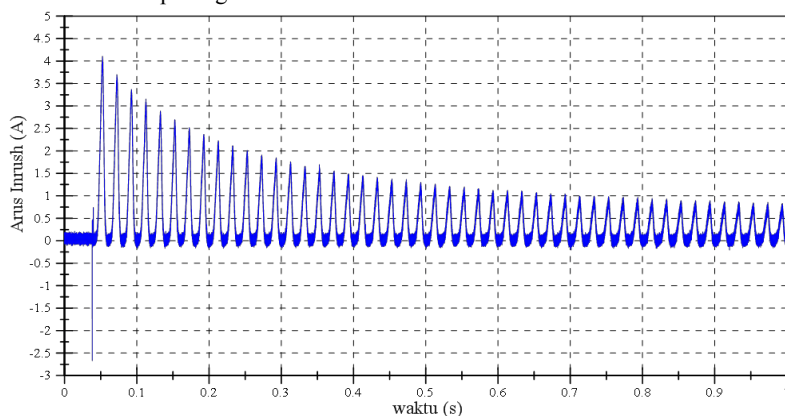
Berdasarkan pengukuran ketiga fasa tersebut, nilai arus inrush pada fasa R mengalami penurunan hingga 2.54 Ampere. Sedangkan nilai arus inrush pada fasa S mengalami penurunan 0.38 Ampere dan fasa T mengalami penurunan hingga 2.99 Ampere. Hasil demagnetisasi ketiga ini menunjukkan keberhasilan metode pada fasa R, S, dan T. Secara keseluruhan dari nilai total arus inrush, hasil demagnetisasi ketiga ini mampu mengurangi nilai arus inrush transformator dibandingkan dengan kondisi pengukuran yang pernah dilakukan sebelumnya.



Gambar 4.34 Arus inrush hasil demagnetisasi ketiga fasa R pada inti cara potong A



Gambar 4.35 Arus inrush hasil demagnetisasi ketiga fasa S pada inti cara potong A



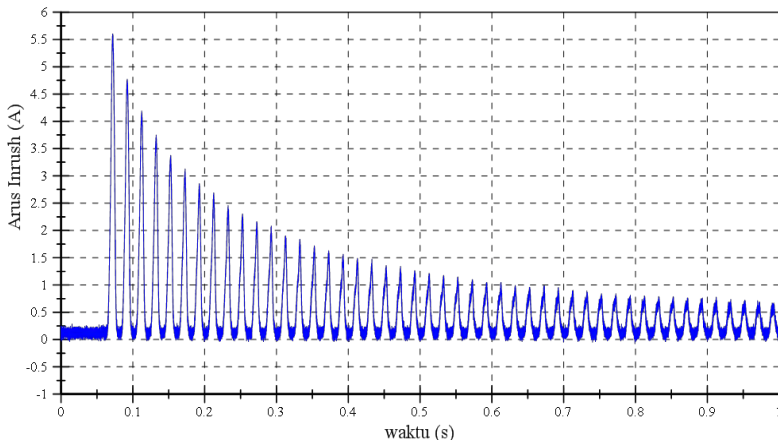
Gambar 4.36 Arus inrush hasil demagnetisasi ketiga fasa T pada inti cara potong A

Eksperimen keempat dilakukan dengan melakukan demagnetisasi selama 7 hari setelah eksperimen ketiga. Pengukuran hasil demagnetisasi ketiga untuk transformator dengan cara potong A pada fasa R menunjukkan nilai arus inrush sama dengan 5.6 Ampere. Arus inrush terjadi selama 600 ms sejak transformator dihubungkan sumber daya. Arus inrush maksimum yang terukur pada fasa R terjadi pada *cycle* pertama. Bentuk gelombang arus inrush fasa R dapat dilihat pada gambar 4.37. Sedangkan pada fasa S nilai arus inrush menunjukkan angka 2.15 Ampere. Arus inrush terjadi selama 600 ms sejak

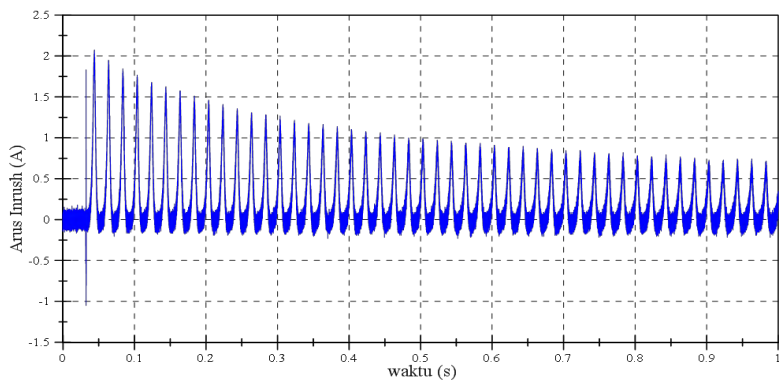
transformator dinyalakan. Arus inrush maksimum yang terukur pada fasa S terjadi pada *cycle* pertama. Bentuk gelombang arus inrush fasa S dapat dilihat pada gambar 4.38. Pada fasa T nilai arus inrush menunjukkan angka 1.6 Ampere. Arus inrush terjadi selama 853 ms sejak transformator dinyalakan. Arus inrush maksimum yang terukur pada fasa T terjadi pada *cycle* pertama. Bentuk gelombang arus inrush fasa T dapat dilihat pada gambar 4.39. Sehingga total arus inrush yang terjadi pada transformator ini senilai 9.35 Ampere.

Berdasarkan pengukuran ketiga fasa tersebut, nilai arus inrush pada fasa R mengalami kenaikan hingga 2.14 Ampere. Sedangkan nilai arus inrush pada fasa S mengalami penurunan 0.57 Ampere dan fasa T mengalami penurunan hingga 2.51 Ampere. Hasil demagnetisasi keempat ini menunjukkan keberhasilan metode pada fasa S dan T. Secara keseluruhan dari nilai total arus inrush, hasil demagnetisasi keempat ini mampu mengurangi nilai arus inrush transformator dibandingkan dengan kondisi pengukuran ketiga.

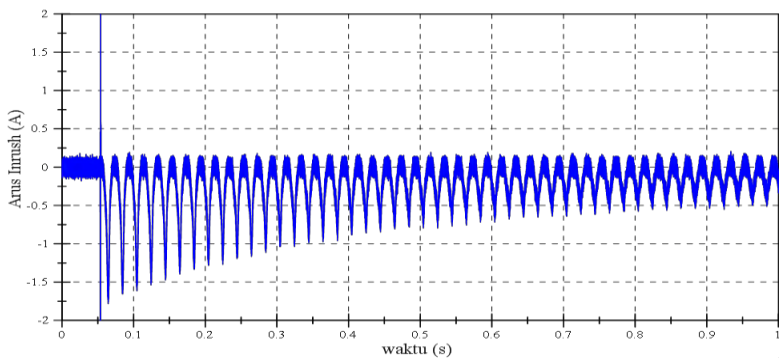
Sedangkan pada inti transformator dengan cara potong B metode demagnetisasi shunt capacitor setelah dilepas dari sumber daya tidak menghasilkan perubahan besar nilai arus yang signifikan. Dengan perlakuan yang sama dengan inti transformator cara potong A, bentuk gelombang tidak menunjukkan perbedaan. Fenomena ini dapat dilihat pada gambar 4.40 hingga gambar 4.42.



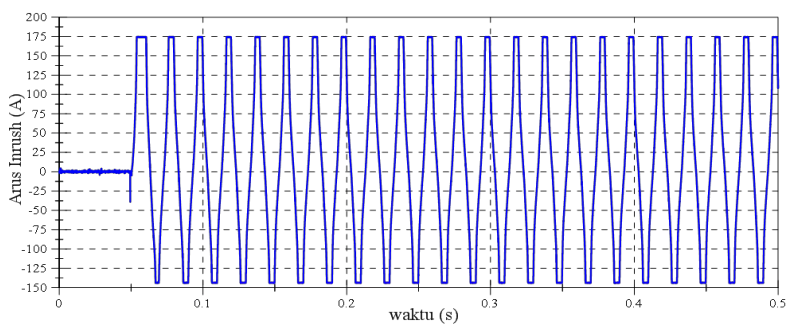
Gambar 4.37 Arus inrush hasil demagnetisasi keempat fasa R pada inti cara potong A



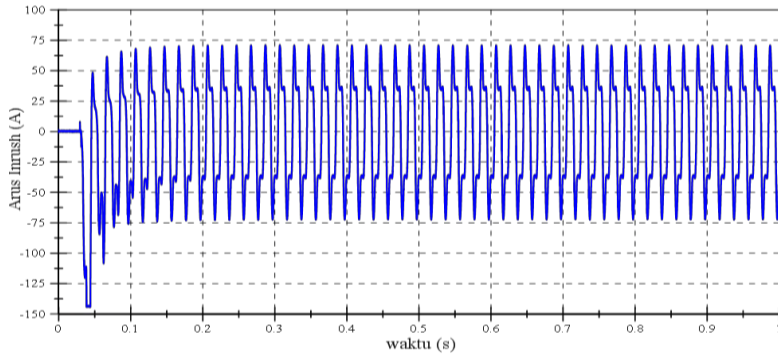
Gambar 4.38 Arus inrush hasil demagnetisasi keempat fasa S pada inti cara potong A



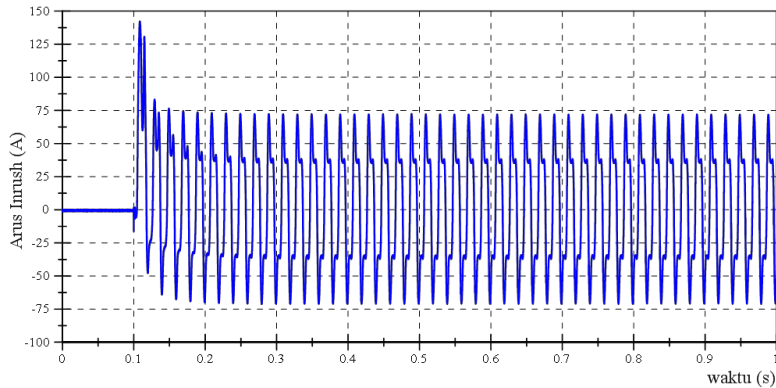
Gambar 4.39 Arus inrush hasil demagnetisasi keempat fasa T pada inti cara potong A



Gambar 4.40 Arus inrush hasil demagnetisasi fasa R pada inti cara potong B



Gambar 4.41 Arus inrush hasil demagnetisasi fasa S pada inti cara potong B

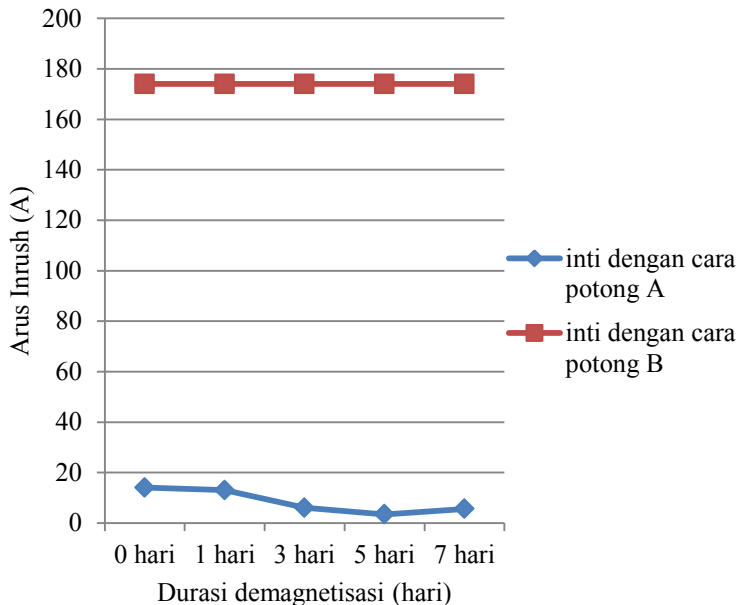


Gambar 4.42 Arus inrush hasil demagnetisasi fasa T pada inti cara potong B

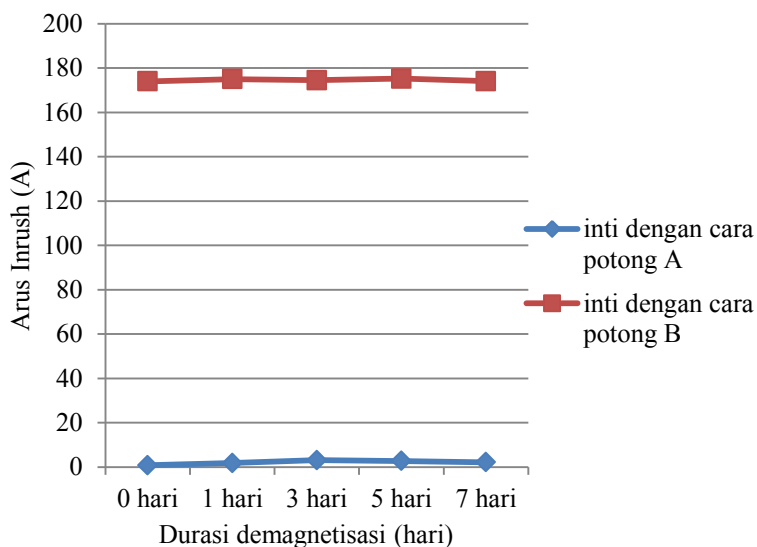
Berdasarkan uraian di atas, hubungan pengaruh durasi demagnetisasi dengan shunt capacitor terhubung setelah operasi dengan nilai arus inrush pada inti transformator dengan cara potong A dibandingkan dengan inti transformator menggunakan cara potong B untuk fasa R dapat diamati melalui Gambar 4.43. Sedangkan perbandingan nilai arus inrush akibat pengaruh durasi demagnetisasi dengan shunt capacitor antara inti transformator dengan cara potong A dengan inti transformator menggunakan cara potong B pada fasa S dan T berturut-turut dapat dilihat pada grafik Gambar 4.44 dan Gambar 4.45.

Berdasarkan data grafik pada gambar 4.43 nilai arus inrush pada transformator dengan cara potong inti A memiliki nilai yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan transformator dengan cara potong inti B.

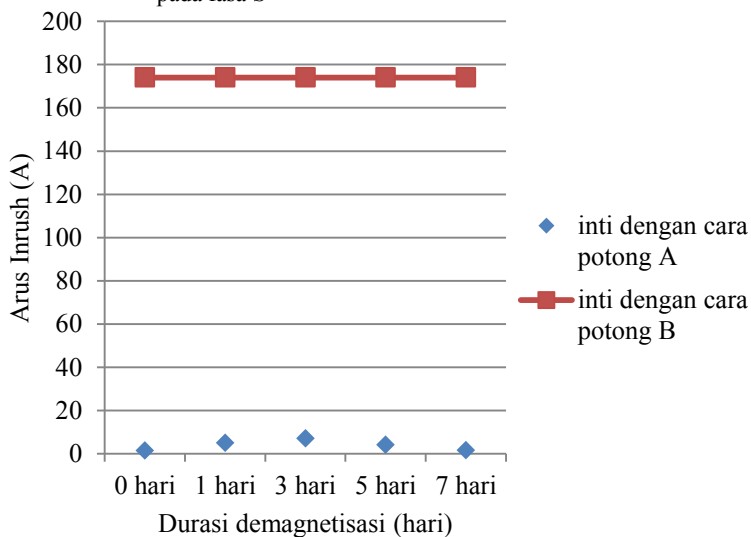
Grafik juga menunjukkan adanya pengurangan nilai arus inrush pada inti transformator dengan cara potong A. Berdasarkan data grafik pada gambar 4.44 nilai arus inrush pada transformator dengan cara potong inti A memiliki nilai yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan transformator dengan cara potong inti B. Grafik juga menunjukkan adanya pengurangan nilai arus inrush pada inti transformator dengan cara potong A, meskipun pada durasi 1 hari menuju 3 hari terdapat kenaikan nilai. Demikian juga dari data grafik pada gambar 4.45 nilai arus inrush pada transformator dengan cara potong inti A memiliki nilai yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan transformator dengan cara potong inti B. Grafik juga menunjukkan adanya pengurangan nilai arus inrush pada inti transformator dengan cara potong A, setelah mengalami kenaikan pada durasi demagnetisasi 1 hingga 3 hari.



Gambar 4.43 Perbandingan arus inrush hasil demagnetisasi shunt capacitor pada fasa R



Gambar 4.44 Perbandingan arus inrush hasil demagnetisasi shunt capacitor pada fasa S

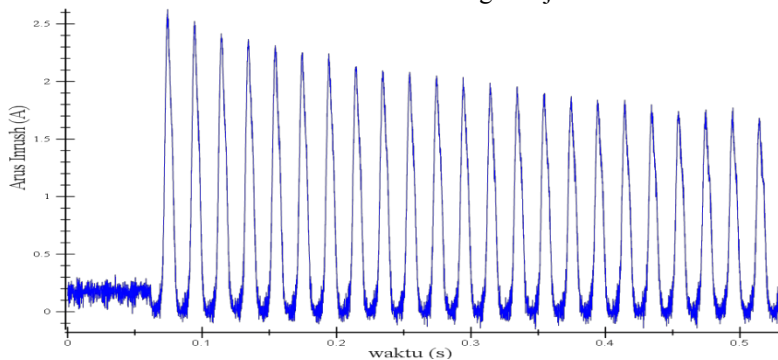


Gambar 4.45 Perbandingan arus inrush hasil demagnetisasi shunt capacitor pada fasa T

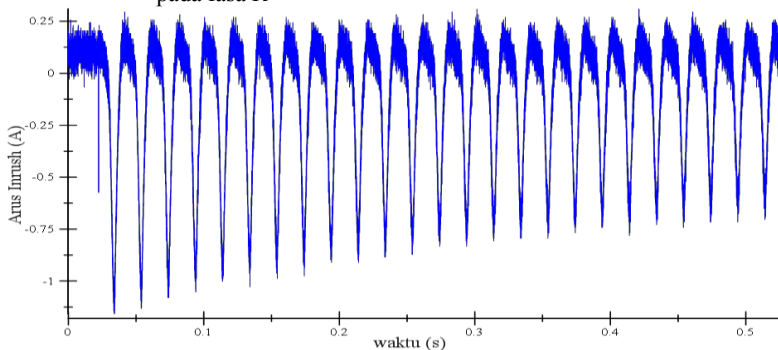
4.4.2 Pengaruh Demagnetisasi dengan Tegangan DC variatif-

Frekuensi Konstan Terhadap Arus Inrush

Metode demagnetisasi menggunakan tegangan DC variatif – frekuensi konstan terhadap arus inrush pada inti transformator dengan cara potong A memiliki pengaruh dalam mengurangi fluks sisa yang terdapat pada transformator. Pengaruh demagnetisasi ini pada fasa R inti transformator dengan cara potong A ditunjukkan pada Gambar 4.46 dan Gambar 4.47. Berdasarkan kedua gambar tersebut dapat diamati bahwa sebelum demagnetisasi dilakukan besar nilai arus inrush senilai 2.57 A. Setelah demagnetisasi menggunakan tegangan DC variatif –frekuensi konstan dilakukan nilai arus inrush berkurang menjadi 1.15 A.

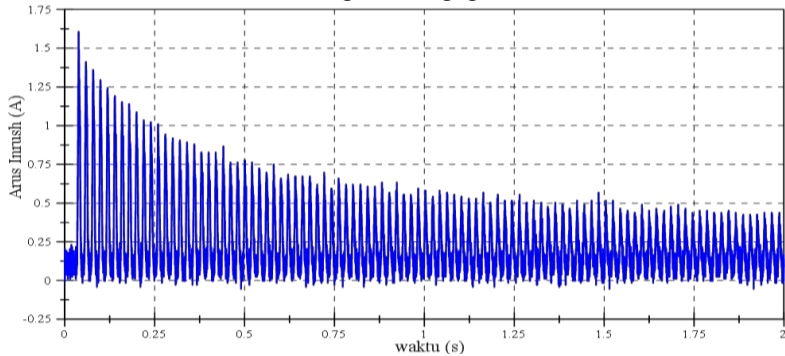


Gambar 4.46 Arus inrush sebelum demagnetisasi inti dengan cara potong A pada fasa R

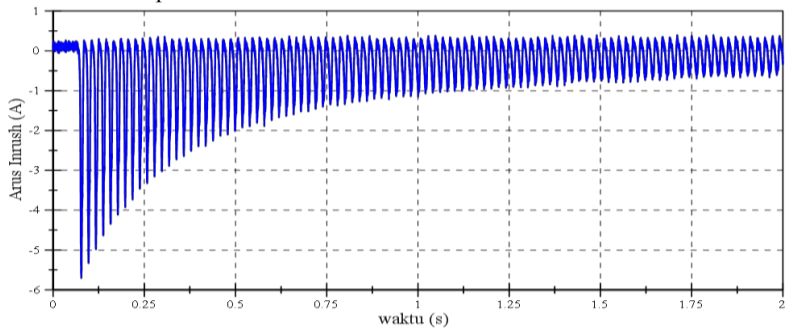


Gambar 4.47 Arus inrush setelah demagnetisasi inti dengan cara potong A pada fasa R

Pengaruh demagnetisasi ini pada fasa S inti transformator dengan cara potong A ditunjukkan pada Gambar 4.48 dan Gambar 4.49. Berdasarkan kedua gambar tersebut dapat diamati bahwa sebelum demagnetisasi dilakukan besar nilai arus inrush senilai 1.5 A. Setelah demagnetisasi menggunakan tegangan DC variatif –frekuensi konstan dilakukan nilai arus inrush berkurang menjadi 5.7A. Sehingga dapat dikatakan untuk kasus ini demagnetisasi gagal dilakukan.

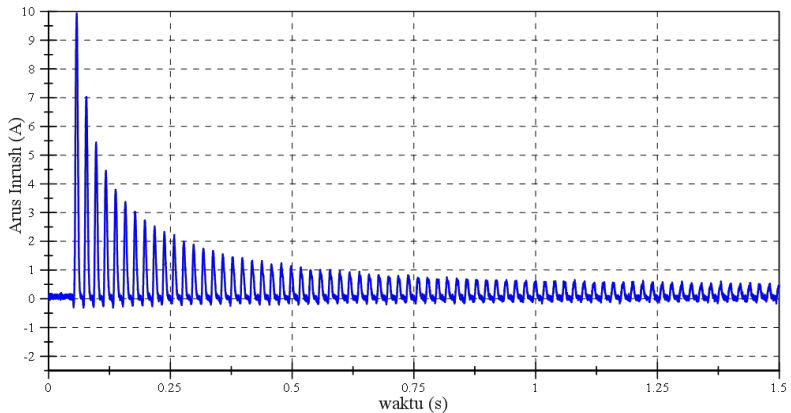


Gambar 4.48 Arus inrush sebelum demagnetisasi inti dengan cara potong A pada fasa S

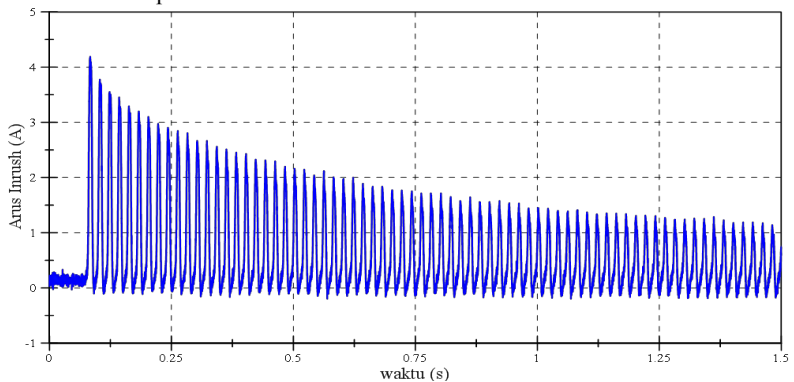


Gambar 4.49 Arus inrush setelah demagnetisasi inti dengan cara potong A pada fasa S

Pengaruh demagnetisasi ini pada fasa T inti transformator dengan cara potong A ditunjukkan pada Gambar 4.50 dan Gambar 4.51. Berdasarkan kedua gambar tersebut dapat diamati bahwa sebelum demagnetisasi dilakukan besar nilai arus inrush senilai 9.94 A. Setelah demagnetisasi menggunakan tegangan DC variatif –frekuensi konstan dilakukan nilai arus inrush berkurang menjadi 4.19 A.



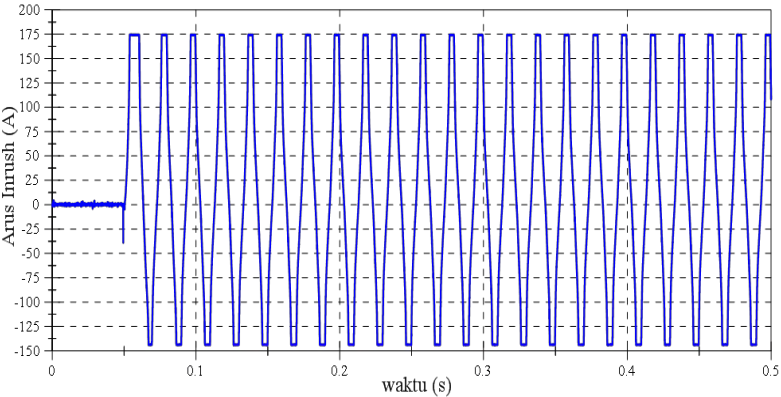
Gambar 4.50 Arus inrush sebelum demagnetisasi inti dengan cara potong A pada fasa T



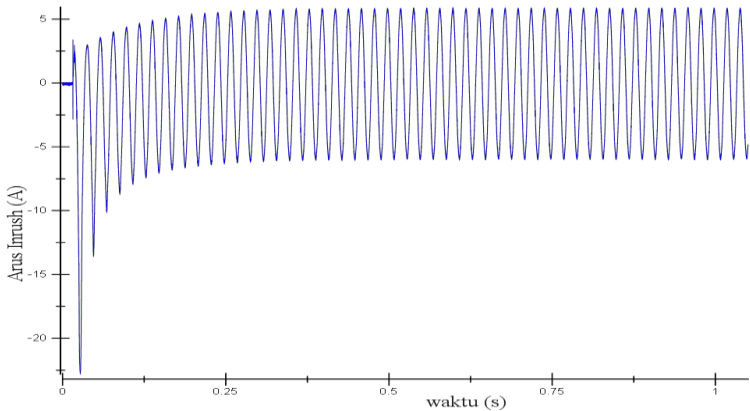
Gambar 4.51 Arus inrush setelah demagnetisasi inti dengan cara potong A pada fasa T

Metode demagnetisasi menggunakan tegangan DC variatif – frekuensi konstan terhadap arus inrush pada inti transformator dengan cara potong B memiliki pengaruh dalam mengubah besar nilai arus yang mengalir ke transformator. Jika pada eksperimen sebelumnya nilai arus inrush hingga melebihi 174 A, pada eksperimen kali ini nilai arus yang mengalir ke transformator dengan cara potong B berkurang. Dapat dilihat pada gambar 4.52, bentuk arus yang mengalir ke transformator berbentuk nonlinier. Arus inrush sebelum didemagnetisasi juga sulit untuk diamati. Namun ketika transformator didemagnetisasi

menggunakan metode tegangan DC variatif –frekuensi konstan bentuk gelombang berubah menjadi linier dan besar arus inrush turun secara signifikan, yakni dari nilai lebih dari 174 A turun hingga 22.8 A. Hasil demagnetisasi transformator dengan cara potong B dapat dilihat pada gambar 4.53.



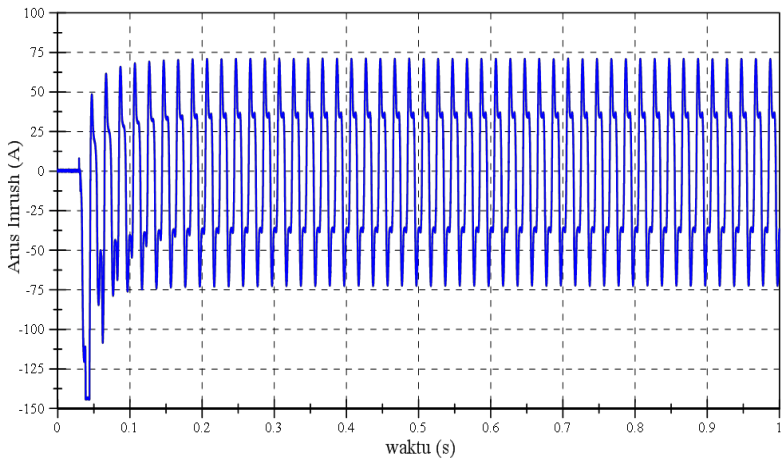
Gambar 4.52 Arus inrush sebelum demagnetisasi inti dengan cara potong B pada fasa R



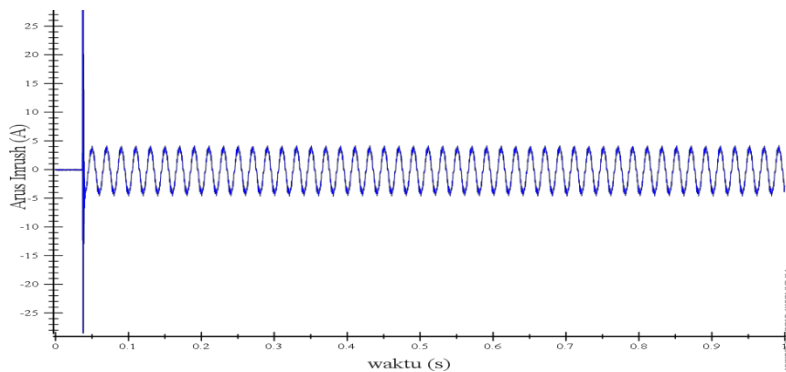
Gambar 4.53 Arus inrush setelah demagnetisasi inti dengan cara potong B pada fasa R

Namun metode demagnetisasi menggunakan tegangan DC variatif –frekuensi konstan terhadap arus inrush pada inti transformator dengan cara potong B pada fasa S tidak memberikan pengaruh

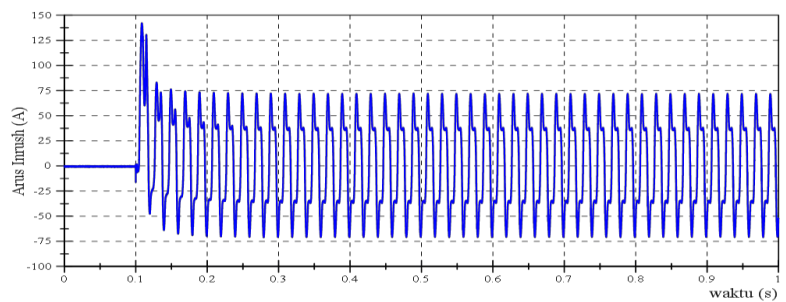
keberadaan arus inrush. Metode ini hanya memberikan pengaruh pada arus yang mengalir di transformator. Jika pada eksperimen sebelumnya nilai arus inrush hingga melebihi 174 A, pada eksperimen kali ini nilai arus yang mengalir ke transformator dengan cara potong B berkurang. Dapat dilihat pada gambar 4.54, bentuk arus yang mengalir ke transformator berbentuk nonlinier. Namun ketika transformator didemagnetisasi menggunakan metode tegangan DC variatif –frekuensi konstan bentuk gelombang memiliki harmonisa dan besar arus yang mengalir turun secara signifikan, yakni dari nilai lebih dari 174 A turun hingga 4.2 A. Hasil demagnetisasi transformator dengan cara potong B dapat dilihat pada gambar 4.55. Demikian juga yang terjadi pada fasa T. Ketika transformator didemagnetisasi menggunakan metode tegangan DC variatif –frekuensi konstan, bentuk gelombang menjadi memiliki harmonisa dan besar arus inrush turun secara signifikan, yakni dari nilai lebih dari 174 A turun hingga 10 A. Kondisi arus yang terekam alat ukur sebelum didemagnetisasi dapat dilihat pada gambar 4.56. Sedangkan kondisi arus inrush setelah mengalami demagnetisasi dapat dilihat pada gambar 4.57.



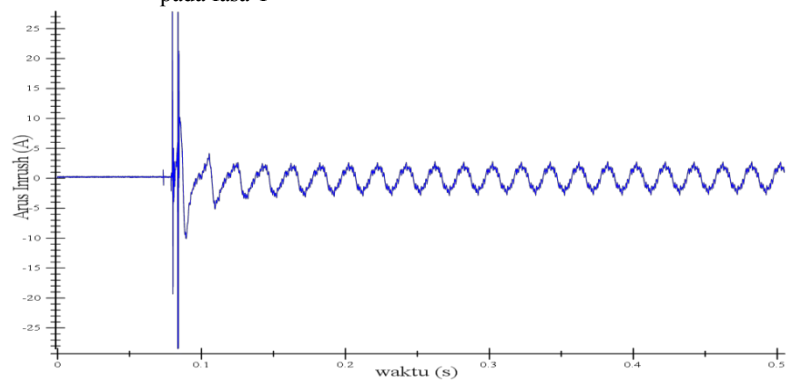
Gambar 4.54 Arus inrush sebelum demagnetisasi inti dengan cara potong B pada fasa S



Gambar 4.55 Arus inrush setelah demagnetisasi inti dengan cara potong B pada fasa S

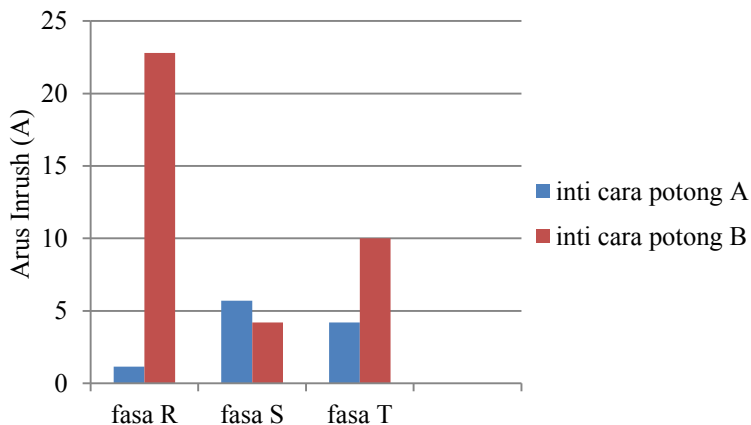


Gambar 4.56 Arus inrush sebelum demagnetisasi inti dengan cara potong B pada fasa T



Gambar 4.57 Arus inrush setelah mengalami demagnetisasi inti dengan cara potong B pada fasa T

Berdasarkan uraian di atas, komparasi hasil demagnetisasi menggunakan metode tegangan DC variatif –frekuensi konstan terhadap nilai arus inrush pada inti transformator dengan cara potong A dibandingkan dengan inti transformator menggunakan cara potong B untuk fasa R, S, dan T dapat diamati melalui grafik pada gambar 4.58. Berdasarkan grafi tersebut dapat diperoleh bahwa nilai arus inrush pada transformator dengan inti menggunakan cara potong B lebih tinggi dibandingkan transformator dengan inti menggunakan cara potong A.



Gambar 4.58 Perbandingan nilai arus inrush hasil demagnetisasi pada inti cara potong A dengan inti cara potong B

Secara umum, berdasarkan tabel 4.9, gambar grafik 4.43, 4.44, dan 4.5, transformator yang memiliki inti dengan cara potong B memiliki nilai arus inrush yang lebih tinggi daripada transformator dengan cara potong A. Arus inrush pada transformator dengan cara potong inti B dapat mencapai 12 kali lipat dibandingkan dengan transformator dengan cara potong inti A. Perbedaan nilai arus inrush yang tinggi tersebut dapat dipengaruhi oleh kurva magnetisasi. Jika ditelisik lebih lanjut perbedaan kurva magnetisasi ini dapat disebabkan perbedaan material yang digunakan dan kerapian konstruksi inti transformator. Kedua penyebab tersebut dapat dimungkinkan karena pembuatan kedua transformator ini dilakukan oleh produsen yang berbeda.

Secara kasat mata material yang digunakan pada transformator dengan cara potong A tampak lebih bersih. Sedangkan material yang digunakan pada transformator dengan cara potong B terdapat karat. Perbedaan elemen penyusun material ini dapat menyebabkan permeabilitas bahan berbeda. Nilai arus inrush yang tinggi pada transformator dengan cara potong inti B juga dapat menunjukkan keberadaan fluks sisa dalam jumlah yang lebih besar dan sulit dihilangkan. Keberadaan fluks sisa tersebut tergantung sifat kemagnetan inti transformator. Di samping itu kerapian susunan laminasi dan potongan inti akan berpengaruh pada konstruksi sambungan inti transformator. Transformator dengan cara potong A memiliki potongan dan susunan laminasi inti yang lebih rapi dan rapat dibandingkan transformator dengan cara potong B. Sehingga jarak (*gap*) antarsambungan inti pada transformator dengan cara potong B lebih tampak dibandingkan transformator dengan cara potong A. Kualitas transformator dengan cara potong B dapat juga dinilai dari bunyi dengung yang dihasilkan transformator saat terhubung dengan sumber daya, meskipun hanya bernilai 60 Volt.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Adapun beberapa hal yang dapat disimpulkan dari penelitian mengenai pengaruh cara pemotongan inti transformator terhadap kurva magnetisasi dan *inrush current* ialah sebagai berikut:

1. Cara pemotongan inti transformator yang berbeda menyebabkan perbedaan distribusi medan magnet yang berbeda pada sisi potongan inti transformator tertentu, meskipun arah lintasan pergerakan medan magnet sama. Perbedaan distribusi medan magnet ini dapat menyebabkan bentuk dan nilai kurva magnetisasi yang berbeda.
2. Nilai B_{maks} , B_{min} , H_{maks} , dan H_{min} pada kurva magnetisasi di titik-titik pengamatan yang terletak pada sambungan antarpotongan inti menunjukkan nilai yang relatif lebih tinggi dibandingkan titik yang tidak terletak pada sambungan antarpotongan inti. Secara umum nilai B_{maks} dan H_{maks} kurva magnetisasi pada inti transformator dengan cara potong B lebih besar daripada inti transformator dengan cara potong A.
3. Elemen penyusun kurva magnetisasi dapat mempengaruhi nilai arus *inrush*. Arus *inrush* pada inti transformator dengan cara potong B menunjukkan nilai yang jauh lebih besar daripada inti transformator dengan cara potong A, baik melalui hasil simulasi maupun hasil eksperimen. Fenomena perbedaan nilai arus *inrush* ini sebanding dengan perbedaan kurva magnetisasi pada inti dengan cara potong berbeda. Namun terdapat faktor impedansi transformator dan keberadaan fluks sisa yang secara signifikan mempengaruhi nilai arus *inrush*.
4. Nilai arus *inrush* juga dipengaruhi oleh keberadaan fluks sisa atau *remanent flux*. Metode demagnetisasi digunakan untuk mendapatkan nilai arus *inrush* dengan keberadaan fluks sisa seminimal mungkin. Metode demagnetisasi menggunakan shunt capacitor dan penerapan tegangan DC variatif - frekuensi konstan secara praktik dapat mengurangi nilai arus *inrush*.

5.2 Penelitian Selanjutnya

Kedua objek transformator yang digunakan pada penelitian ini tidak benar-benar identik secara material dan kerapian konstruksi inti transformator. Sehingga pengamatan terhadap pengaruh cara potong inti transformator masih dipengaruhi faktor material dan kerapian konstruksi inti transformator. Oleh sebab itu validasi lebih lanjut perlu dilakukan dengan menggunakan perbandingan objek transformator material yang benar-benar identik dan konstruksi inti serapi mungkin.

Metode demagnetisasi yang digunakan pada penelitian ini hanya mengamati perubahan nilai arus inrush. Penelitian lebih lanjut mengenai perubahan fluks akibat metode demagnetisasi dapat dilakukan untuk pengembangan teknologi demagnetisasi.

Daftar Pustaka

- [1] Chapman, Stephen. J. "*Electric Machinery Fundamentals : Fourth Edition*," McGraw-Hill Education, New York, 2005.
- [2] C. E. Lin, C. L. Cheng, C. L. Huang, and J. C. Yeh, "*Investigation of magnetizing inrush current in transformers. II. Harmonic analysis*," IEEE Trans. Power Del., vol. 8, no. 1, pp. 255-263, Jan. 1993.
- [3] C. E. Lin, C. L. Cheng, C. L. Huang, and J. C. Yeh, "*Investigation of magnetizing inrush current in transformers. I. Numerical simulation*," IEEE Trans. Power Del., vol. 8, no. 1, pp. 246-254, Jan. 1993.
- [4] K. Yabe, "*Power differential method for discrimination between fault and magnetizing inrush current in transformers*," IEEE Trans. Power Del., vol. 12, no. 3, pp. 1109-1118, Jul. 1997.
- [5] P. L. Mao and R. K. Aggarwal, "*A novel approach to the classification of the transient phenomena in power transformers using combined wavelet transform and neural network*," IEEE Trans. Power Del., vol. 16, no. 4, pp. 654-660, Oct. 2001.
- [6] J. J. Rico, E. Acha, and M. Madrigal, "*The study of inrush current phenomenon using operational matrices*," IEEE Trans. Power Del., vol. 16, no. 2, pp. 231-237, Apr. 2001.
- [7] A. A. Adly, "*Computation of inrush current forces on transformer windings*," IEEE Trans. Magn., vol. 37, no. 4, pp. 2855-2857, Jul. 2001.
- [8] Paul C . Y. Ling and Amitava Basak, "*Investigation of Magnetizing Inrush Current in a Single-phase Transformer*," IEEE Transactions On Magnetics., vol. 24, no. 6, November 1988.
- [9] Shin-Der Chen, Ray-Lee Lin, and Chih-Kun Cheng, "*Magnetizing Inrush Model of Transformers Based on Structure Parameters*," IEEE Transactions On Power Delivery, vol. 20, no. 3, July 2005.
- [10] Paul S. Moses, Mohammad A. S. Masoum, and Moayed Moghbel, "*Effects of Iron-Core Topology on Inrush Currents in Three-Phase Multi- Leg Power Transformers*," IEEE 978-1-4673-2729-9/12/\$31.00 ©2012.
- [11] M. Khelil, and M. Elleuch, "*Modelling of the Air-Gaps of Overlapped Joints in Tree-Phase Transformer Iron core for using by FEM*," 6th International Multi-Conference on Systems, Signal and Devices ©2009.

- [12] Budi. Arif, “*Pengaruh Cara Pemotongan Inti Transformator Terhadap Kurva Magnetisasi Dan Inrush Current*,” Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2015.
- [13] M. Jamali, M. Mirzaie, and S. Asghar Gholamian, “*Calculation and Analysis of Transformer Inrush Current Based on Parameters of Transformer and Operating Conditions*,” ISSN 1392-1215 ©2011.
- [14] Fitzgerald, A. E., Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans, “*Electric Machinery : Sixth Edition*,” McGraw-Hill Education, New York, 2003.
- [15] Zaglmayr, S., “*High Order Finite Element Methods for Electromagnetic Field Computation*,” Johannes Kepler Universit`at, Linz, 2006.
- [16] Baris Kovan, Francisco de León, Dariusz C., and Leo Birenbaum, “*Mitigation of Inrush Currents in Network Transformers by Reducing the Residual Flux With an Ultra-Low-Frequency Power Source*,” IEEE Transactions On Power Delivery, 0885-8977/\$26.00 © 2011.
- [17] N. Chiesa, A. Avendaño, H. K. Høidalen, B. A. Mork, D. Ishchenko, and A. P. Kunze., “*On the ringdown transient of transformers*” International Conference on Power Systems Transient, Lyon, June 2007.
- [18] Francisco de León, A. Farazmand, S. Jazebi, Digvijay Deswal, and R. Levi, “*Elimination of Residual Flux in Transformers by the Application of an Alternating Polarity DC Voltage Source*” IEEE Transactions on Power Delivery 0885-8977, 2013.
- [19] Chiesa, N., “*Power Transformer Modeling for Inrush Current Calculation*,” Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, June 2010.

Riwayat Hidup



Rahman Cahyadiputra, lahir di Kota Gresik, 13 Juli 1993. Riwayat pendidikan penulis dimulai di SD Muhammadiyah I Gresik, lulus pada tahun 2005. Kemudian ia lulus dari SMP Negeri 1 Gresik pada tahun 2008. Tahun 2011 ia lulus dari SMA Negeri 1 Gresik. Pendidikannya ia lanjutkan ke jenjang perguruan tinggi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS), Fakultas Teknologi Industri, Jurusan Teknik Elektro pada tahun 2011. Dalam program sarjana-nya penulis mengambil bidang studi Sistem Tenaga Listrik dan fokus pada riset mengenai karakteristik transformator. Selama kuliah penulis pernah menjadi Ketua Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Teknologi Industri ITS pada periode 2013-2014. Ia juga menjadi Menteri Koordinator Komunikasi Internal Kampus Badan Eksekutif Mahasiswa ITS pada periode 2014-2015. Penulis pernah menjadi finalis National Innovation Contest MFEST yang diselenggarakan oleh Himpunan Mahasiswa Mesin ITB. Penulis dapat dihubungi melalui email rahmancahyadiputra@gmail.com.

Halaman ini sengaja dikosongkan